

**GENİŞ BANT ARALIKLI SİLİSYUM KARBÜR TABANLI
MOSFET ALT-MODÜL TASARIMI**

**WIDE BANDGAP SILICON CARBIDE BASED MOSFET
SUB-MODULE DESIGN**

AHMET FURKAN TUNCER

DOÇ. DR. DİNÇER GÖKCEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

GENİŞ BANT ARALIKLI SİLİSYUM KARBÜR TABANLI MOSFET ALT-MODÜL TASARIMI

Ahmet Furkan TUNCER

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN

Ocak 2024, 115 sayfa

Geniş bant aralığına sahip yarıiletkenlerden olan silisyum karbür (SiC) tabanlı anahtarların silisyum (Si) tabanlı anahtarlara göre yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, yüksek termal iletkenlik, yüksek bozulma gerilimi gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Bu üstün özellikleriyle daha verimli, hacim ve ağırlık açısından da daha küçük sistemler elde edilmektedir. Bu avantajları sayesinde elektrikli araçlar, şarj istasyonları, yenilenebilir enerji ve raylı araç uygulamaları gibi birçok alanda silisyum karbür bileşiğinin kullanımı artarak devam etmektedir. SiC tabanlı anahtarların yonga bağlama, tel bağlama gibi paketleme çalışmaları sonucu SiC MOSFET modül oluşturulmaktadır. Paketleme teknolojisi de anahtarın çalışma sıcaklığını, frekansını, güç kayıplarını ve elektromanyetik bağışıklılığını belirlediği için silisyum karbürden tam performans alınabilmesi için paketleme teknolojisinin geliştirilmesi önemlidir. Tez çalışması kapsamında modül paketleme yapısına uygun alt modül tasarımı ve simülasyon faaliyetleri tamamlanmıştır. Devamında da kullanıma hazır ticari SiC MOSFET ve SiC diyot yongaları temin edilip üretimi gerçekleştirilmiştir. Alt modül üretimi sırasında çift tarafı bakır kaplı Al_2O_3 seramik alt katmanın bakır yolları lazer kazıma cihazıyla oluşturulup yonga bağlama işlemleri yapılmıştır. Yonga ile dış arayüz arasındaki elektriksel bağlantılarında 1mil altın tel kullanılarak tel bağlama işlemi gerçekleştirilip

izolasyon (kapsülleme) malzemesinin uygulanmasıyla alt modülün çalışma gerilimi yükseltilmiştir. Elde edilen alt modülün akım-gerilim karakteristiklerinin çıkarılmasının yanında kaçak akım testi, $R_{ds(on)}$ direncinin ölçülmesi gibi testlerle tasarım doğrulamaları gerçekleştirilmiştir. Ardından çift darbe test devresi ile üretilen alt modülün farklı kapı sürme dirençleriyle 600V ve 800V gerilimler altında testler yapılmıştır. Test verileri kullanılarak anahtarlama süreleri ve anahtarlama kayıpları hesaplanıp grafikler oluşturulmuştur. Testler sonucunda 20 Ω kapı sürme direncinde toplam iletme girme süresi (t_{on}) 132ns, toplam iletimden çıkma süresi (t_{off}) 90ns, 800V/20A altındaki iletme giriş kaybı (E_{on}) 636.3 μ J ve iletimden çıkış kaybı (E_{off}) 304.1 μ J; 5 Ω kapı sürme direncinde toplam iletme girme süresi (t_{on}) 54ns, toplam iletimden çıkma süresi (t_{off}) 59ns, 800V/20A altındaki iletme giriş kaybı (E_{on}) 197.8 μ J ve iletimden çıkış kaybı (E_{off}) 190.8 μ J olarak hesaplanmıştır. Alt modülden alınan ölçüm sonuçlarıyla aynı SiC MOSFET yongayı kullanan fakat ayrık paket yapısıyla üretilmiş C3M0075120J anahtarın veri sayfasındaki değerlerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: SiC MOSFET, Yarım Köprü, Modül Paketleme, Karakterizasyon, Çift Darbe Testi.

ABSTRACT

WIDE BANDGAP SILICON CARBIDE BASED MOSFET SUB-MODULE DESIGN

Ahmet Furkan TUNCER

Master of Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Dinçer GÖKCEN

January 2024, 115 pages

Silicon carbide (SiC) based devices, which are an example of wide bandgap semiconductors, have several advantages over silicon (Si) based devices, such as operating at high temperatures, high thermal conductivity, and high breakdown voltage. With these superior features, more efficient and smaller systems in volume and weight are obtained. Thanks to these advantages of silicon carbide compounds, their usage is increasing in various fields such as electric vehicles, charging stations, renewable energy, and railway applications. SiC MOSFET module is formed through packaging processes of bare dies such as die bonding and wire bonding. The packaging technology plays a crucial role in determining the device's operating temperature, frequency, power losses and electromagnetic immunity to achieve full performance from silicon carbide. In this thesis study, sub-module design and simulation activities suitable for the module packaging structure have been completed. Subsequently, commercial off-the-shelf SiC MOSFET and SiC diode dies were obtained, and sub-module production was carried out. During sub-module production, a double-sided copper-coated Al₂O₃ ceramic substrate was utilized, and copper paths were created with a laser-engraving device. Then, the die bonding operation was performed. For the electrical connections between the die and the external interface, the wire bonding process was performed using 1 mil gold wire. The sub-module's operating voltage was increased by applying insulation (encapsulation)

material. In addition, the current-voltage characteristics of the obtained sub-module were extracted, and tests such as leakage current test and $R_{ds(on)}$ resistance measurement were carried out for design verifications. The test data were obtained from the sub-module produced with the double pulse test circuit under 600V and 800V, and with different gate drive resistors. Using these data, switching times and switching losses were calculated, and graphs were plotted. As a result of the tests, at 20 Ω gate drive resistor, the total turn-on time (t_{on}) was 132ns, the total turn-off time (t_{off}) was 90ns, the turn-on loss (E_{on}) under 800V/20A was 636.3 μ J, and the turn-out loss (E_{off}) was 304.1 μ J. At a 5 Ω gate drive resistor, the total turn-on time (t_{on}) was calculated as 54ns, the total turn-off time (t_{off}) was calculated as 59ns, the turn-on loss (E_{on}) under 800V/20A was 197.8 μ J, and the turn-off loss (E_{off}) was calculated as 190.8 μ J. The measurement results obtained from the submodule were compared with the values in the datasheet of the C3M0075120J switch, which uses the same SiC MOSFET chip but is produced with a discrete package structure.

Keywords: SiC MOSFET, Half Bridge, Module Packaging, Characterization, Double Pulse Test.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamı tamamlamama yönelik sağladığı destek, anlayış ve güçlü motivasyon için öncelikle sevgili eşime, tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan anneme ve babama teşekkür ederim.

Yüksek lisansa tekrar başlamamda büyük desteği olan ve tez boyunca hem teknik açıdan hem de manevi açıdan her konuda yardımcı olan danışmanım Doç Dr. Dinçer GÖKCEN ve ekip liderim Dr. Doğan YILDIRIM'a teşekkür ederim. Teknik ve idari konuda sağladıkları destekler için Sayın Berkan ÇAKIR'a, alt modül üretimindeki destekleri için iş arkadaşlarım Murat ASLAN ve Ömer ÖÇAL'a, kapı sürücü kartındaki destekleri için iş arkadaşım Ozan Güney DÜŞMEZER'e çok teşekkür ederim.

ASELSAN'a, Hacettepe Üniversitesi Mikro ve Nano Sistemler (MNS) Araştırma Laboratuvarı'na ve öğrencilerine sağladıkları tüm destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER, TASARIM VE ANALİZ	6
2.1. SiC MOSFET Anahtar ve Avantajları	6
2.2. Paketleme ve Paketleme Basamakları.....	9
2.2.1. Alt Katman Seçimi/İşlenmesi.....	10
2.2.2. Yonga Bağlama	12
2.2.3. Tel/Şerit Bağlama.....	12
2.2.4. Dekuplaj Kondansatör Entegrasyonu.....	14
2.2.5. Kapsülleme Malzemesinin Uygulanması.....	15
2.3. Malzeme Seçimi	15
2.3.1. Yonga Seçimi	15
2.3.2. Alt Katman Seçimi	19
2.3.3. Yonga Bağlama	20
2.3.4. Tel/Şerit Bağlama.....	21
2.3.5. Kapsülleme Malzemesi	25
2.3.6. Analizler	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
3.1. Üretim Çalışmaları	33
3.1.1. Alt Katman Tasarımı ve Üretimi.....	33
3.1.2. Test Devresi Tasarımı, Analizi ve Üretimi	34
3.1.3. Alt Modül Üretimi.....	45
3.1.4. İzolasyon Malzemesinin Uygulanması	46
3.2. Düşük Gerilim Test Çalışmaları.....	52

3.2.1. Düşük Gerilim ve Düşük Akım ile I-V Karakteristiği.....	52
3.2.2. Kaçak Akım Testi	54
3.2.3. Ters-Paralel (Anti-Paralel) Diyot I-V Karakteristik	55
3.2.4. $R_{ds(on)}$ İletim Direnci Ölçümü	56
3.3. Yüksek Gerilim Test Çalışmaları-1	57
3.3.1. Yüksek Gerilim ve Düşük Akım ile I-V Karakteristik	57
3.3.2. Düşük Gerilim ve Yüksek Akım I-V Karakteristiği.....	59
3.3.3. Direnç Yüğü ile Anahtarlama Testleri.....	66
3.3.4. Yüksek Gerilim Ölçüm Aletinin Etkisi	71
3.4. Yüksek Gerilim Test Çalışmaları-2	75
3.4.1. Bobin Yüğü ile Anahtarlama Testleri.....	75
3.4.2. Alt Modül Anahtarlama Sürelerinin Hesaplanması.....	85
3.4.3. Alt Modül Anahtarlama Kayıplarının Hesaplanması	90
4. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	97
5. KAYNAKLAR	100
EKLER.....	112
EK 1 - Türkçe/İngilizce Sözlük	112
EK 2 - Yüksek Lisans Tez Çalışması Orjinallik Raporu	114
ÖZGEÇMİŞ	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.1. Bant aralığı gösterimi ve örnek değerler	6
Şekil 2.1.2. SiC MOSFET avantajları	7
Şekil 2.1.3. Si ve SiC tabanlı anahtarlar için filtre elemanları karşılaştırması [16]	8
Şekil 2.1.4. SiC MOSFET modül üreticileri ve örnekleri ([45]'ten esinlenilmiştir)	9
Şekil 2.2.1. DBC ve DBA alt katman termal karakteristik karşılaştırması [49]	11
Şekil 2.2.2. Basıncılı gümüş sinterleme uygulaması	12
Şekil 2.2.3. Tel bağlama (solda) ve şerit bağlama (sağda) örnekleri	13
Şekil 2.3.1. Ölçekli alt katman boyutları ve isimlendirmeleri	19
Şekil 2.3.2. Referans alt katmanlar ile farklı alt katman opsiyonlarının karşılaştırılması	19
Şekil 2.3.3. Anahtar üzerinde oluşan ısı kaybının aktarımı [84]	20
Şekil 2.3.4 Modül ve soğutucu plaka basitleştirilmiş termal modelin alt bileşenleri ([102]'den esinlenilmiştir)	29
Şekil 2.3.5. Modül katmanları ve termal eşdeğer devresi	30
Şekil 3.1.1. Yarım köprü alt modül devre şeması	33
Şekil 3.1.2. Lazer işleme sonrası elektriksel yolların oluşturulduğu alt katman	34
Şekil 3.1.3. Test düzeneği yerleşimi	35
Şekil 3.1.4. LTspice test devre şeması	36
Şekil 3.1.5. Simülasyon ortamında çift darbe test sonucu. (a) Test edilen anahtarın V_{ds} gerilimi ve I_L bobin akımı. (b) Test edilen anahtarın V_{gs} gerilimi ve I_D akımı.	37
Şekil 3.1.6. Alt modülün parazitik endüktansı 200nH için simülasyon sonucu. (a) Test edilen anahtarın V_{ds} gerilimi ve I_L bobin akımı. (b) Test edilen anahtarın V_{gs} gerilimi ve I_D akımı.	38
Şekil 3.1.7. Alt modülün parazitik endüktansı 4nH için simülasyon sonucu. (a) Test edilen anahtarın V_{ds} gerilimi ve I_L bobin akımı. (b) Test edilen anahtarın V_{gs} gerilimi ve I_D akımı.	39
Şekil 3.1.8. Alt modülün parazitik endüktansı 20nH için anahtarlama kaybı simülasyon sonucu. (a) İletime giriş kaybı, E_{on} . (b) İletimden çıkış kaybı, E_{off}	41
Şekil 3.1.9. DPT test kartının devre şeması	42
Şekil 3.1.10. Çift taraflı BDK devre çizimi	43
Şekil 3.1.11. Prototip test kartı üretimi	43
Şekil 3.1.12. Bağlantıları tamamlanan test devresinin yandan görünümü	44
Şekil 3.1.13. Test devresi bağlantılarının gerçekleştirilmesi. (a) Alt modül ile arayüz devre kartının elektriksel bağlantısı. (b) Arayüz devre kartı ile karkas devre kartının mekanik bağlantısı. (c) Alt modülün karkas devre kartına yerleştirilmesi.	44
Şekil 3.1.14. Test devresinde kullanılan yaylı pinlerin hareketli yapısının gösterimi. (a)Yaylı pin uzaklaştırılmış gösterimi. (b)Hareketsiz konumda. (c-e)Hareketli konumda.	45
Şekil 3.1.15. SiC MOSFET ve SiC diyot yongaların görseli. (a) SiC MOSFET üst yüzeyi. (b) SiC MOSFET alt yüzeyi. (c) SiC diyot üst yüzeyi. (d) SiC diyot alt yüzeyi.	45
Şekil 3.1.16. Tel ve yonga bağlama sonrası alt modül görseli. (a)Uzaklaştırılmış görünüm. (b)Yakından görünüm.	46

Şekil 3.1.17. Tel bağlama sonrası yongaların optik mikroskop görüntüsü. (a) SiC MOSFET üzerindeki tel bağlar ve adetleri (b) SiC diyot üzerindeki tel bağlar ve adetleri.....	46
Şekil 3.1.18. Farklı izolasyon mesafesindeki kartlar	47
Şekil 3.1.19. (a) Gerilim dayanım test düzeneği. (b) Örnek osiloskop görüntüsü.....	48
Şekil 3.1.20. (a) Örnek test bağlantısı. (b) Gerilim atlamaının oluşması. (c) Gerilim atlamaı sırasındaki osiloskop görüntüsü.....	49
Şekil 3.1.21. İzolasyon malzemesi uygulanmış FR4 kart.....	50
Şekil 3.1.22. İzolasyon malzemesinin alt modüle uygulanması. (a) Uygulama öncesi görünüm. (b) Uygulama sonrası görünür ve UV ışık altındaki görünüm. (c) UV ışık altındaki görünümü.....	50
Şekil 3.1.23. Gerilim atlamaı nedeniyle zarar gören alt modül. (a)Uzaklaştırılmış görünüm. (b)Yakından görünüm.	51
Şekil 3.2.1. Düşük gerilim ve düşük akım test düzeneği	52
Şekil 3.2.2. Örnek ölçüm görseli. (a) Kaynakmetre üzerinde alınan ölçüm. (b) Kaynakmetrede kaydedilen verilerin MATLAB ortamında çizdirilmesi. ...	53
Şekil 3.2.3. Düşük gerilim ve 1A altında SiC MOSFET I-V karakteristiği-1. (a) Ölçüm aletlerinin bağlantı sonrası görünümü. (b) Ölçüm sonuçları.	53
Şekil 3.2.4. 200V ve düşük akım altında SiC MOSFET I-V karakteristiği-2. (a) Ölçüm aletlerinin bağlantı sonrası görünümü. (b) Ölçüm sonuçları.	54
Şekil 3.2.5. Alt modül SiC MOSFET kaçak akım testi. (a) Pozitif kapı gerilimine karşılık kaçak akım grafiği. (b) Negatif kapı gerilimine karşılık kaçak akım grafiği.	55
Şekil 3.2.6. Alt modül test-paralel SiC Diyot I-V Karakteristiği	55
Şekil 3.2.7. Farklı kapı geriliminde iletim direnci ölçümü. (a) Ölçüm aletlerinin bağlantı sonrası görünümü. (b) Ölçüm sonuçları.....	56
Şekil 3.3.1. Yüksek gerilim ve düşük akım test düzeneği	58
Şekil 3.3.2. Yüksek gerilim düşük akım osiloskop sonuçları. (a) Kapı gerilim -6V uygulandığında. (b) Kapı gerilimi +15V uygulandığında.....	58
Şekil 3.3.3. Yüksek gerilim düşük akım altında SiC MOSFET I-V karakteristiği.....	59
Şekil 3.3.4. Düşük gerilim yüksek akım SiC MOSFET osiloskop sonucu	60
Şekil 3.3.5. Üretilen SiC MOSFET alt modülün I-V karakteristiği	61
Şekil 3.3.6. SiC MOSFET ayrık anahtar I-V karakteristiği [103]	62
Şekil 3.3.7. Yüksek akımda alt modüldeki ters-paralel diyotun osiloskop sonucu	64
Şekil 3.3.8. Yüksek akım altında alt modüldeki ters-paralel diyotun I-V karakteristiği	64
Şekil 3.3.9. Ayrık anahtarın ters-paralel diyotun I-V karakteristiği [77]	65
Şekil 3.3.10. Yüksek gerilim anahtarlama test düzeneği	67
Şekil 3.3.11. Test devresi ve ölçüm aleti bağlantıları	67
Şekil 3.3.12. Yüksek gerilim DC güç kaynağının osiloskop ölçümüne etkisi.....	68
Şekil 3.3.13. İzole olmayan sistemlerin basitleştirilmış gösterimi [131].....	68
Şekil 3.3.14. Osiloskop güç beslemesinin izole trafodan sağlanması	69
Şekil 3.3.15. 800Vdc gerilim altından 11k Ω dirençle anahtarlama testi. (a)Uzaklaştırılmış görünüm. (b)İletime giriş anı. (c)İletimden çıkış anı.	69
Şekil 3.3.16. Test direnci simülasyon sonucu.....	70
Şekil 3.3.17. 800Vdc gerilim altından 1k Ω dirençle anahtarlama testi. (a)Uzaklaştırılmış Görünüm. (b)İletime giriş anı. (c)İletimden çıkış anı.	71
Şekil 3.3.18. Ölçüm aleti bağlantıları	72
Şekil 3.3.19. Farklı gerilim probu ile alınan ölçümlerin karşılaştırılması. (a) İletime giriş anı. (b) İletimden çıkış anı.	73

Şekil 3.3.20. Farklı türdeki ölçüm aletlerinin eşdeğer devresi ve akım yolları. (a)Yüksek gerilim fiber optikli izole ölçüm aleti. (b)Geleneksel yüksek gerilim diferansiyel ölçüm aleti [133].	75
Şekil 3.4.1. Çift darbe test devre şeması	76
Şekil 3.4.2. Çift darbe testi ölçüm noktaları	77
Şekil 3.4.3. Kapı direnci 20Ω iken kapı sürücünün çıkış gerilimi. (a) İletime girme anı. (b) İletimden çıkma anı.	78
Şekil 3.4.4. Farklı kapı dirençlerinin kapı sürücü iletime giriş süresine etkisi	79
Şekil 3.4.5. Farklı kapı dirençlerinin kapı sürücü iletimden çıkış süresine etkisi	79
Şekil 3.4.6. DC bara gerilimi 0V iken SiC MOSFET'in kapı-kaynak gerilimi. (a) $R_g=20\Omega$. (b) $R_g=5\Omega$.	80
Şekil 3.4.7. DC bara gerilimi 0V iken farklı kapı dirençlerinin SiC MOSFET'in iletime giriş süresine etkisi	81
Şekil 3.4.8. DC bara gerilimi 0V iken farklı kapı dirençlerinin SiC MOSFET'in iletimden çıkış süresine etkisi	81
Şekil 3.4.9. Kapı direnci 20Ω iken 400V/13A değerinde anahtarlama testi. (a)Birinci ve ikinci darbe görseli. (b)İkinci darbenin yakından görünümü. (c)İletime giriş anı. (d)İletimden çıkış anı.	83
Şekil 3.4.10. Kapı direnci 20Ω iken 600V/20A değerinde anahtarlama testi. (a)Birinci ve ikinci darbe görseli. (b)İkinci darbenin yakından görünümü. (c)İletime giriş anı. (d)İletimden çıkış anı.	83
Şekil 3.4.11. Kapı direnci 20Ω iken 800V/20A değerinde anahtarlama testi. (a)Birinci ve ikinci darbe görseli. (b)İkinci darbenin yakından görünümü. (c)İletime giriş anı. (d)İletimden çıkış anı.	84
Şekil 3.4.12. Farklı kapı dirençleri için 800V/20A değerinde iletime giriş karşılaştırması. (a) I_D akımı. (b) V_{gs} gerilimi. (c) V_{ds} gerilimi. (d) I_{diyot} akımı.	85
Şekil 3.4.13. Farklı kapı dirençleri için 800V/20A değerinde iletimden çıkış karşılaştırması. (a) I_D akımı. (b) V_{gs} gerilimi. (c) V_{ds} gerilimi. (d) I_{diyot} akımı.	86
Şekil 3.4.14. Üretilen SiC MOSFET alt modülün kapı direncine karşılık anahtarlama süresi grafiği	89
Şekil 3.4.15. Örnek iletime giriş kaybının hesaplaması	91
Şekil 3.4.16. Örnek iletimden çıkış kaybının hesaplaması	92
Şekil 3.4.17. Üretilen SiC MOSFET alt modülün 600V gerilim altında akıma karşılık anahtarlama kaybı grafiği	95
Şekil 3.4.18. Üretilen SiC MOSFET alt modülün 800V gerilim altında akıma karşılık anahtarlama kaybı grafiği	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.1 Si, SiC ve GaN tabanlı anahtarların güç/frekans tablosu ([36]'dan esinlenilmiştir).....	6
Çizelge 2.2.1. Farklı çaptaki Al ve Au tellerin akım taşıma kapasitesi [57]	14
Çizelge 2.3.1. SiC MOSFET ve diyot yongaların karşılaştırması	16
Çizelge 2.3.2. SiC MOSFET ve SiC Schottky diyot yongaların özellikleri.....	18
Çizelge 2.3.3. Tel/Şerit çapına karşılık tel/şerit sayısı.....	22
Çizelge 2.3.4. Farklı tasarım seçenekleri ve özellikleri	23
Çizelge 2.3.5 Farklı tasarım bağ sayısı ve toplam kullanılacak tel uzunlukları	25
Çizelge 2.3.6 Kapsülleme malzemeleri ve özellikleri	25
Çizelge 2.3.7. Tasarım parametreleri.....	26
Çizelge 3.1.1. Farklı parazitik endüktans değerlerindeki akım ve gerilim salınımlarının karşılaştırması.....	40
Çizelge 3.1.2. Farklı parazitik endüktans değerlerindeki anahtarlama kayıplarının karşılaştırması.....	41
Çizelge 3.2.1. Farklı kapı gerilimlerine karşılık 2-Tel ve 4-Tel ölçüm yöntemiyle alınan iletim direnç sonuçları	56
Çizelge 3.3.1. Alt modülün 0-10A değerindeki gerilim değerleri	61
Çizelge 3.3.2. Ayrık SiC MOSFET anahtarın 0-10A değerindeki gerilim değerleri	62
Çizelge 3.3.3. Alt modül ile ayrık SiC MOSFET anahtar gerilimlerinin karşılaştırması.....	62
Çizelge 3.3.4. Alt modül ile ayrık anahtar gerilim değerleri ve karşılaştırması	65
Çizelge 3.4.1. İletime giriş ve iletimden çıkış dirençlerinin ölçüm sonuçları	78
Çizelge 3.4.2. Üretilen SiC MOSFET alt modül anahtarlama süreleri.....	87
Çizelge 3.4.3. C3M0075120J SiC MOSFET anahtarlama süreleri [103]	88
Çizelge 3.4.4. Alt modül ve C3M0075120J anahtarlama sürelerinin karşılaştırması	88
Çizelge 3.4.5. 600V gerilim altında farklı kapı dirençleri için üretilen alt modül ile C3M0075120J anahtarların anahtarlama kayıpları.....	93
Çizelge 3.4.6. 800V gerilim altında farklı kapı dirençleri için üretilen alt modül ile C3M0075120J anahtarların anahtarlama kayıpları.....	93
Çizelge 3.4.7. 600V ve 800V gerilim altındaki anahtarlama kayıplarının karşılaştırması	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{tt}	Tepe-Tepe Akım
C_p	Paralel Parazitik Kapasitans
ΔI	Akım Değişimi
ΔV	Gerilim Değişimi
E_{off}	İletimden Çıkış Enerji Kaybı
E_{on}	İletime Giriş Enerji Kaybı
E_{sw}	Anahtarlama Enerji Kaybı
f_{sw}	Anahtarlama Frekansı
I_D	Akaç Akımı
I_{gss}	Kapı-Kaynak Kaçak Akımı
I_L	Faz Akımı
I_{ort_yng}	Ortalama Yonga Akımı
I_{rms_P}	Pozitif Bölgedeki RMS Akımı
I_{rms_N}	Negatif Bölgedeki RMS Akımı
I_{test}	Test Akımı
I_{tepe}	Tepe Akımı
I_{yng}	Yonga Akımı
N_{MOSFET}	MOSFET Sayısı
P_{cond}	İletim Güç Kaybı
P_{sw}	Anahtarlama Güç Kaybı
P_t	Toplam Güç Kaybı
$R_{ds(on)}$	Akaç-Kaynak İletim Direnci
$R_{g(off)}$	İletimden Çıkış Kapı Direnci
$R_{g(on)}$	İletime Giriş Kapı Direnci
$t_{d(off)}$	İletimden Çıkış Gecikme Süresi
$t_{d(on)}$	İletime Giriş Gecikme Süresi
t_f	Düşme Süresi
t_{off}	İletimden Çıkış Süresi
t_{on}	İletime Giriş Süresi

t_r	Yükselme Süresi
$V_{DC-link}$	DC-link Gerilimi
V_{ds}	Akaç-Kaynak Gerilimi
V_{gs}	Kapı-Kaynak Gerilimi
V_{ll}	Faz-Faz Gerilim
V_{test}	Test Gerilimi
V_{tt}	Tepe-Tepe Gerilim

Kısaltmalar

A	Anot (İng, Anode)
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum Oksit/Alümina
AlN	Alüminyum Nitrat
Au	Altın
BDK	Baskı Devre Kartı
BJT	Bipolar Bağlantılı Transistör (İng, Bipolar Junction Transistor)
BW	Bant Genişliği (İng, Bandwidth)
C	Katot (İng, Cathode)
C	Kondansatör (İng, Capacitor)
CAN	Denetleyici Alan Ağı (İng, Controller Area Network)
CTE	Termal Genleşme Katsayısı (İng, Coefficient of Thermal Expansion)
Cu	Bakır
D	Akaç (İng, Drain)
DBC	Doğrudan Bağlı Bakır Kaplama (İng, Direct Bonded Copper)
DPT	Çift Darbe Testi (İng, Double Pulse Test)
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk (İng, Electromagnetic Compatibility)
EMI	Elektromanyetik Girişim (İng, Electromagnetic Interference)
G	Kapı (İng, Gate)
GaAs	Galyum Arsenit
GaN	Galyum Nitrat (İng, Gallium Nitride)

IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör (İng, Insulated Gate Bipolar Transistor)
I-V	Akım-Gerilim (İng, Current-Voltage)
L	Bobin (İng, Inductor)
Mİ	Modülasyon İndeksi (İng, Modulation Index)
MLCC	Çok Katmanlı Seramik Kondansatör (İng, Multilayer Ceramic Capacitor)
MOSFET	Metal-Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (İng, Metal Oxide semiconductor Field-Effect Transistor)
Ni	Nikel
NTC	Negatif Sıcaklık Katsayısı (İng, Negative Temperature Coefficient)
Pb	Kurşun
PF	Güç Faktörü (İng, Power Factor)
PPM	Milyonda Bir Birim (İng, Part Per Million)
PTC	Pozitif Sıcaklık Katsayısı (İng, Positive Temperature Coefficient)
R	Direnç (İng, Resistor)
S	Kaynak (İng, Source)
Si	Silisyum/Silikon
SiC	Silisyum Karbür (İng, Silicon Carbide)
Sn	Kalay (İng, Tin)
UV	Morötesi (İng, Ultraviolet)

1. GİRİŞ

Dünyada elektrik enerjisi 19. Yüzyıl sonlarında, ülkemizde ise 20. Yüzyıl başlarında kullanılmaya başlanmıştır [1]. Her geçen gün elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç tüm dünyada artmaya devam etmektedir [2]. Elektrik enerjisinin bir formdan başka bir forma çevrilmesi (örneğin alternatif akımdan doğru akıma dönüştürme) güç elektroniği dönüştürücüleriyle mümkündür. Şarj aletlerinden elektrikli araçlara, yenilenebilir enerjiden endüstriyel cihazlar gibi birçok alanda güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılmaktadır [3]. Güç elektroniği dönüştürücüleri temel olarak kondansatör, bobin ve direnç gibi pasif elemanlar ile BJT (İng, bipolar junction transistor), MOSFET (İng, metal oxide semiconductor field-effect transistor) veya IGBT (İng, insulated gate bipolar transistor) gibi yarıiletken anahtarların bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır.

Farklı element veya bileşikler kullanarak kontrollü bir şekilde ilettime giren ve iletimden çıkan aygıtlara yarıiletken anahtar denir. Güç elektroniği dönüştürücülerinde de silisyum (Si) tabanlı anahtarlar yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin yüksek gerilim (>650V) ve yüksek akım (>100A) ihtiyacı olan motor sürücü uygulamaları ve yenilenebilir enerji dönüştürücüleri gibi birçok sistemde Si tabanlı IGBT anahtarlar yaygın olarak tercih edilmektedir [4]. Fakat IGBT anahtarların çalışma sıcaklığı, anahtarlama frekansı ve güç kaybı gibi özelliklerde Si elementinin fiziksel sınırlarına ulaşması nedeniyle alternatif yarıiletken ihtiyacı oluşmuştur [5]. Si elementine alternatif olarak silisyum karbür (SiC) bileşiği bulunmaktadır.

Geniş bant aralığına (İng, wide-band gap) sahip yarıiletkenlerden olan SiC bileşiğinin Si elementine göre birçok avantajı bulunmaktadır. SiC bileşiği yüksek sıcaklıklarda çalışabilme (>300°C) özelliği [6] ile birlikte Si elementine kıyasla yaklaşık 3 kat daha yüksek termal iletkenliğe (İng, thermal conductivity), yaklaşık 10 kat daha yüksek bozulma gerilimine (İng, breakdown voltage) ve yaklaşık 3 kat daha yüksek bant aralığına sahiptir [7–10]. Bu özellikleri sayesinde SiC tabanlı anahtarlar (örneğin SiC MOSFET) daha yüksek anahtarlama frekansı ve yüksek güç yoğunluğuna ulaşabilmektedir. Ayrıca anahtarlama frekansının artması ile daha küçük değerlerde pasif elemanlar (bobin, kondansatör) kullanılabilir. Böylece hem boyut açısından daha küçük hem de ağırlık açısından daha hafif sistemler elde edilebilmektedir [11–13]. Yüksek anahtarlama frekansı ile kontrolcünün bant genişliği artıp devre tasarımında daha basit devre topolojilerinin

kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca daha hızlı cevap verebilen sistemler oluşturulmaktadır. Tüm bunların sonucunda da sistemin verimliliği artmaktadır. Bu avantajlar bazı teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Artan güç yoğunluğu ile anahtar boyutlarında küçülmeler, küçülen anahtar boyutuyla da termal direnç artışı beraberinde gelmektedir [14]. Termal kapasitans değeri de küçülen anahtar boyutuyla birlikte azalıp anahtarın daha hızlı ısınmasına neden olmaktadır. Bu durum da daha küçük alanda daha verimli soğutma sistemlerine ihtiyacı arttırmaktadır [15]. SiC MOSFET anahtarların bir diğer dezavantajı da kısalan anahtarlama süresi ile yüksek gerilim değişiminin ($\Delta V/\Delta t$) oluşmasıdır. Yüksek gerilim değişimi de yüksek elektromanyetik girişimlere (İng, electromagnetic interference, EMI) neden olmaktadır ve kullanılan anahtarda güvenilirlik sorunlarını ortaya çıkarmaktadır [16]. Yüksek gerilim değişimi ile çevre ekipmanlarda hasarlar (örneğin motor sürücü uygulamaları için motor izolasyon malzemesinin delinmesi) oluşabilmektedir. SiC MOSFET anahtarların kullanılmasıyla artan anahtarlama frekansı, birim zamandaki (örneğin 1 saat içerisinde) anahtar ve çevre ekipmanlar üzerindeki gerilim değişimi sonucu oluşan stresin artmasında ve devamında da daha hızlı yaşlanmasına (İng, ageing) neden olabilmektedir [17]. Son olarak SiC MOSFET anahtarların maliyeti geleneksel anahtarlara göre daha fazladır [18].

Geniş bant aralığına sahip anahtarlama elemanlarının avantajlarından dolayı yüksek gerilim (>650V) ve yüksek akım (>100A) ihtiyacı olan raylı araç sistemleri, elektrikli araç çekiş sistemleri, yenilenebilir enerji gibi sistemlerde tercih edilmektedir [19–22]. SiC MOSFET üretici firmaların daha yüksek adetlerde üretmesiyle anahtar maliyetlerinin düşeceği, artan anahtar güvenilirliği ve üstün özellikleri sayesinde daha çok tercih edilmesi beklenmektedir. Yapılan araştırmalarda da SiC tabanlı anahtar marketinin gün geçtikçe artacağı [23]; özellikle elektrikli araçlar (İng, electric vehicle), şarj istasyonları (İng, charger station), fotovoltaj dönüştürücü (İng, photovoltaic converter) ve raylı sektöründe (İng, railway industry) 2024-2026 yıllarında kayda değer artışlar olacağı öngörülmektedir [24]. SiC tabanlı anahtarlardaki artan talep, paketleme teknolojisine duyulan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir.

Yonga (İng, die), alt katman (İng, substrate) ve elektrikli terminaller arasında bağlantı yapılarak anahtarlama elemanı oluşturulmasına paketleme denir. Paketleme teknolojisi yonga geliştirme teknolojisinden farklı bir teknoloji olup anahtarlama elemanının çalışma sıcaklığını, gerilimini, anahtarlama frekansını, anahtarın iletim direnci ve parazitik

endüktans değerini, anahtarlama kayıplarını ve elektromanyetik uyumluluğunu (İng, electromagnetic compatibility, EMC) belirlemektedir. Temelde iki farklı paket yapısı bulunmaktadır. Bunlar tek bir yonganın bulunduğu ayırık paket (İng, discrete package) ve birden fazla yonganın bulunduğu modül paket (İng, module package) yapılarıdır. IGBT gibi Si tabanlı anahtarlarda kullanılan klasik paketleme yöntemleri SiC tabanlı anahtarların olumlu yanlarını sınırlamaktadır [25]. SiC tabanlı anahtarlar yüksek sıcaklıklarda çalışabilirken, geleneksel paketleme malzemeleri ve yöntemleri (örneğin tel bağlama (İng, wire bonding), yonga bağlama (İng, die bonding) ve kapsülleme (İng, encapsulation) malzemeleri yüksek sıcaklıklara dayanamadığı için anahtarın performansını sınırlamaktadır. Bu yüzden paketleme teknolojisinin geliştirilmesi ile SiC tabanlı anahtarlardan tam performans alınabilecektir.

Modül paketleme teknolojisi dört bölüme ayırarak ifade edilecek olursa bunlar; alt katman malzemesinin işlenmesi, yonga bağlama, tel/şerit bağlama ve kapsülleme malzemesinin uygulanmasıdır [26]. Alt katman, yüzeyi iletken kaplanan seramik (yalıtkan) malzeme olup hem izolasyonu hem de ısı aktarımını sağlayan malzemedir. Yonga bağlama işlemi ise alt katman ile yonganın birleştirilmesini sağlayıp hem termal hem de elektriksel iletimi sağlamaktadır. Seçilen alt katman ve yonga bağlama malzemelerin, SiC bileşiğinin termal genleşme katsayısına (İng, coefficient of thermal expansion, CTE) yakın olması ve yüksek termal iletkenliğin olması paketleme için önemli parametrelerdir. Tel bağlama işlemi de yonganın üst yüzeyi ile elektriksel terminaller arasındaki bağlantının oluşturulmasını sağlar. Yonganın anahtarlama sırasında oluşan kayıplar sonucunda yonga üzerinde devamlı ısınma/soğuma gerçekleşir. Bu nedenle yüksek termal döngüye (İng, thermal cycling) maruz kalmaktadır. Yonganın üst yüzeyine bağlanan teller ise termal döngü sonucu oluşan sıcaklık değişimi ile genişip büzülür ve üzerinde mekanik stres oluşup telin hasar görmesiyle sonuçlanabilir [27]. Ayrıca yüksek sıcaklık nedeniyle de tel bağlar zarar görebilmektedir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda çalışan anahtarlarda tel bağlama yönteminin önemini arttırmaktadır. Son olarak modülün içi kapsülleme malzemesiyle (örneğin silisyum jel) doldurulmaktadır. Kapsülleme malzemesi ile farklı gerilim seviyelerine sahip bölgelerin kaçak yolunu (İng, creepage) ve izolasyon boşluğunu (İng, clearance) iyileştirip izolasyon seviyesini hava ortamından daha yüksek seviyelere çıkartmaktadır. Bu sayede hem modülün çalışma gerilimi yükseltilecek gerilim atlamaları engellenmektedir hem de nem, çözücü, gaz, titreşim ve radyasyon gibi çevresel etmenlere karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Bahsedilen modül

paketleme basamaklarıyla birden fazla yonganın bulunduğu modül paket yapısında anahtar elde edilmektedir.

Yüksek güç uygulamalarında birden fazla yonganın paralel bağlanıp akım seviyesinin, dolayısıyla güç seviyesinin arttırılabildiği modül paket yapısındaki anahtarlar tercih edilmektedir. IGBT anahtarlar azınlık taşıyıcı aygıt (İng, minority carrier device) özelliğindedir ve negatif sıcaklık katsayısına (İng, negative temperature coefficient) sahiptir. MOSFET anahtarlar ise çoğunluk taşıyıcı aygıt (majority carrier device) özelliğinde olup pozitif sıcaklık katsayısına (İng, positive temperature coefficient) sahiptir. Pozitif sıcaklık katsayısına sahip anahtarlama elamanı ısındıkça anahtarın direnci artarken, negatif sıcaklık katsayısına sahip anahtarlarda direnç azalmaktadır. Modül içerisinde paralellenen anahtarların anahtarlama kayıpları sonucunda ısınıp direnç değeri değişmektedir [28, 29]. Bu yongalardan birisi diğerlerinden daha fazla ısınması durumunda direnç değeri diğer yongalardan farklılık gösterebilmektedir. Negatif sıcaklık katsayısına sahip anahtarlarda sıcaklığın artmasıyla yonganın direnci diğerlerine göre daha düşük olacağı için daha yüksek akım çekmeye devam eder ve daha çok ısınır. Dayanabileceği azami sıcaklığa ulaştığı zaman da modülün zarar görmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle IGBT gibi negatif sıcaklık katsayısına sahip yongaların paralel bağlanması için elektriksel parametreleri olabildiğince yakın olan yongaların aynı modül içerisinde kullanılması gerekmektedir. Pozitif sıcaklık katsayısına sahip MOSFET yongalar ise sıcaklık arttıkça direnç değeri artıp üzerinden geçen akım azalmaktadır. Bu sayede anahtar daha az ısınır ve modül içerisinde paralellenen yongaların özel olarak seçilmesine gerek kalmadan doğal yollarla sağlanabilmektedir. Fakat paralellenen yongalar arasındaki elektriksel özelliklerin özdeş olmaması dışında paketlemeden kaynaklı farklı parazitik elemanlara sahip olabilir. Bunun sonucunda yongalardaki akım dağılımının eşit olmamasına ve güvenilirlik sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır [30]. Bu nedenle modül içerisindeki yongaların paralel bağlanmasında parazitik elemanların birbirine yakın olması önemli kriterlerdendir.

SiC tabanlı anahtarların yüksek frekanslarda çalışabilmesi en büyük avantajlarından biridir. Fakat anahtarlama süresinin kısalması bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Paketlemeden kaynaklanan parazitik elemanların değerleri idealde sıfır olması gerekirken uygulamalarda sıfırdan büyük değerlidir. Parazitik elemanlar, yüksek akım değişimi (dI/dt) nedeniyle yüksek gerilim aşımına (İng, voltage overshoot),

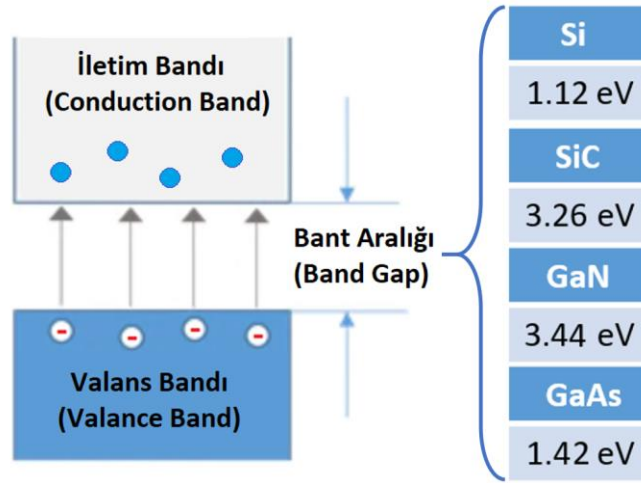
devamında da akım ve gerilimde salınımlara (İng, oscillation) neden olmaktadır. Bununla birlikte oluşan elektrik alan değişimi ile elektromanyetik girişimler ortaya çıkarmaktadır [31, 32]. Tüm bunlar, anahtarlama elemanının performansını sınırlamaktadır. Bu nedenle, parazitik parametrelerin mümkün olduğunca düşük olması önemlidir, ki bu da paketleme yönetiminin geliştirilmesiyle mümkündür.

Tez kapsamında, paketleme süreç ve teknolojilerin kazanımı adına $1200V_{DC}$ bozulma gerilimine sahip hazır SiC MOSFET yonganın modül tipinde paketlenmesi gerçekleştirilip oluşturulan paketin elektriksel karakteristiği elde edilmiştir. Tez “2. Genel Bilgiler, Tasarım ve Analiz”, “3. Deneysel Çalışmalar” ve “4. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar” başlıklarından oluşmaktadır. “2. Genel Bilgiler, Tasarım ve Analiz” başlığı altında SiC MOSFET anahtar ve avantajları ile birlikte paketleme basamaklarından bahsedilmiştir. Devamında ise modül paketleme sırasında kullanılan malzemelerin seçimi, güç kaybı ve termal analiz hesaplamalarına yer verilmiştir. “3. Deneysel Çalışmalar” başlığında ise gerçekleştirilen alt modül üretim basamakları ve simülasyon çalışmalarından bahsedilmiştir. Ardından üretilen alt modülün akım-gerilim (I-V) karakteristiğinin çıkartılması, kaçak akım testi, iletim direncinin ($R_{ds(on)}$) ölçümü gibi gerçekleştirilen elektriksel testler anlatılmıştır. Son olarak çift darbe testi (İng, double pulse test, DPT) ile ölçümler alınıp bilgisayar ortamına taşınmıştır. Alt modülün anahtarlama süresi (İng, switching time) ve anahtarlama kayıpları (İng, switching losses) MATLAB/Simulink ortamında hesaplanıp referans alınan SiC MOSFET ayırık anahtarın veri sayfası kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Son olarak “4. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar” başlığında ise elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER, TASARIM VE ANALİZ

2.1. SiC MOSFET Anahtar ve Avantajları

Elektronların valans bandından iletim bandına geçmek için ihtiyaç duydukları enerjiye bant aralığı denir. Yüksek bant aralığına sahip yarıiletkenlere ise geniş bant aralıklı yarıiletken denir. Silisyum karbür (SiC), galyum nitrat (GaN) gibi yarıiletkenler geniş bant aralığına sahip yarıiletkenlere örnektir. Kıyaslama amacıyla Si, SiC, GaN ve GaAs malzemelerin bant aralıkları Şekil 2.1.1’de verilmiştir [33].



Şekil 2.1.1. Bant aralığı gösterimi ve örnek değerler

Si tabanlı anahtarlara kıyasla daha yüksek anahtarlama frekansında çalışabilen SiC ve GaN tabanlı anahtarlarla hem daha verimli hem de daha küçük sistemler elde edilebilir [34, 35]. SiC ve GaN tabanlı anahtarlama elemanları ve Si tabanlı anahtarlama elemanlarının güç/frekans tablosu Çizelge 2.1.1’de verilmiştir [36].

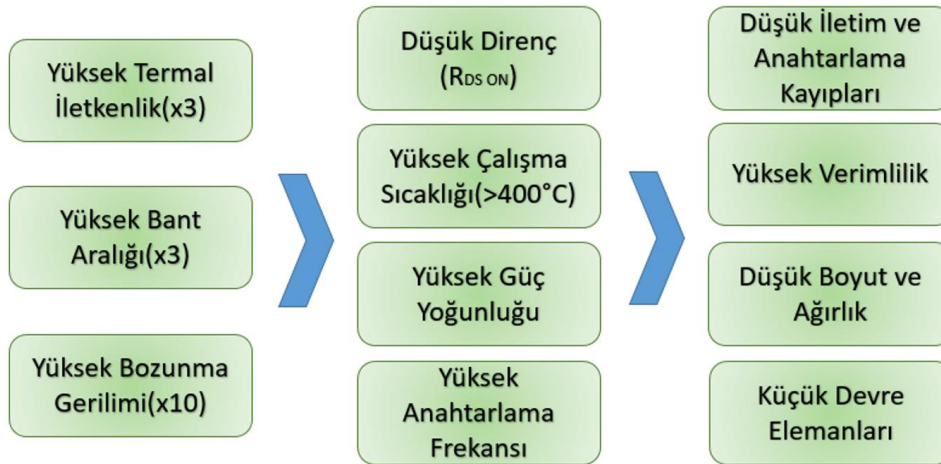
Çizelge 2.1.1 Si, SiC ve GaN tabanlı anahtarların güç/frekans tablosu ([36]’dan esinlenilmiştir)

Anahtar Türü	Frekans Aralığı	Güç Aralığı	Gerilim Aralığı	Çalışma Sıcaklığı
Si	0-500kHz	0-10MW	30-27kV	<150°C
SiC	0-1MHz	5k-10MW	600-15kV	>200°C
GaN	10k-5MHZ	0-30kW	30-600V	>200°C

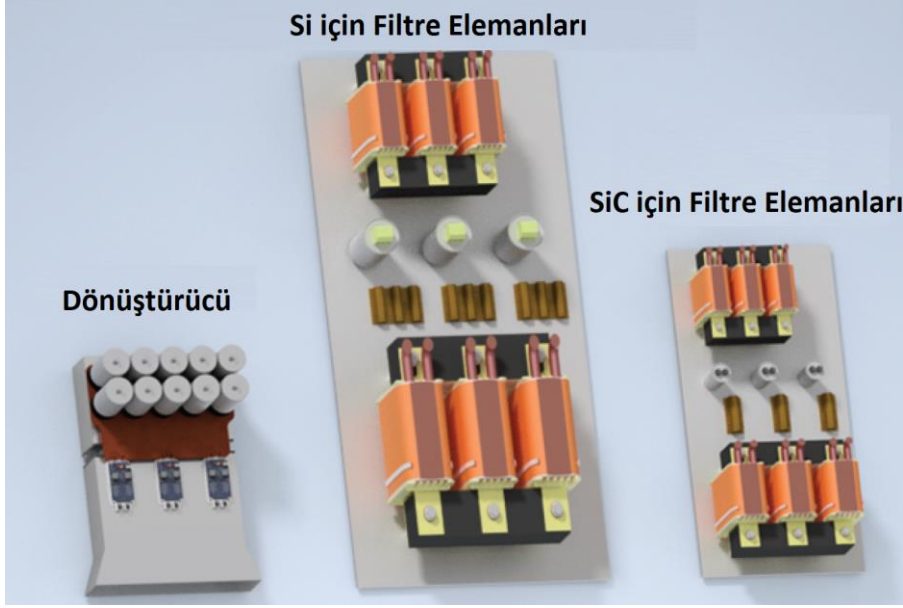
Geniş bant aralıklı yarıiletkenlerden olan SiC tabanlı anahtarlar, Si tabanlı klasik anahtarlara kıyasla birçok avantajları bulunmaktadır. SiC tabanlı anahtarların öne çıkan yönleri aşağıda sıralanmıştır [37–39].

- Yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ($>300^{\circ}\text{C}$).
- Termal iletkenliği daha fazladır.
- Daha hızlı anahtarlanabilir.
- Sistemin küçülmesini sağlar.
- Sistemin verimliliğini yükseltir.

Bahsedilen SiC tabanlı yarıiletkenlerin üstün özellikleri ve bu üstün özellikleriyle öne geçen yönleri Şekil 2.1.2’de verilmiştir. Şekil 2.1.3’te ise Si ve SiC tabanlı anahtarlar ile tasarlanan sistemlerin ihtiyaç duyduğu filtre eleman (direnç, bobin, kondansatör) boyutları verilmiştir. Fuentes vd. yaptığı çalışmaya göre Si yerine SiC tabanlı anahtar kullanılmasıyla filtre elemanların toplam boyutu ve ağırlığı sırasıyla %64 daha küçük ve %68 daha hafiftir [16]. Boyut ve ağırlıktaki düşüşü sağlayan en önemli parametre, artan anahtarlama frekansı ile daha küçük elektriksel değerlerdeki (kapasitans, endüktans, direnç) filtre elemanlarının kullanılabilmesidir.



Şekil 2.1.2. SiC MOSFET avantajları

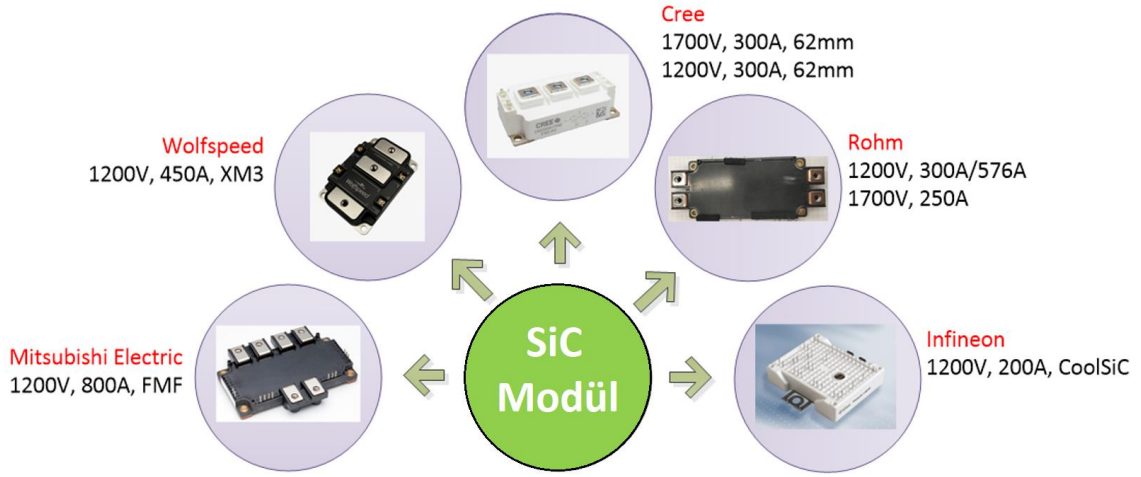


Şekil 2.1.3. Si ve SiC tabanlı anahtarlar için filtre elemanları karşılaştırması [16]

Anahtarlama elemanı olarak IGBT yerine SiC MOSFET kullanılırsa ;

- Anahtarlama kayıpları daha az olduğu ve ölü-zaman kısaldığı için daha yüksek frekanslara çıkılabilir.
- Güç yoğunluğu daha fazla olduğu için güç modülü boyutu dolayısıyla soğutucu plaka boyutu küçülür.
- Yüksek frekansta anahtarlama ile daha kaliteli akım/gerilim dalga şekilleri elde edilir.
- Yüksek frekansta anahtarlama ile daha basit topolojiler ve daha basit algoritma kullanılabilir.
- Yüksek frekansta anahtarlama ile ihtiyaç duyulan akım değişimi (ΔI) azaldığı için kondansatör, bobin gibi pasif elemanların boyutları küçülür.
- Sistem içerisindeki devre elemanları küçüldüğü için sistemin ağırlık ve boyutu azalır.

SiC MOSFET modül üreten bazı firmaların ürünleri ve akım/gerilim değerleri Şekil 2.1.4'te verilmiştir [40–44]. Mitsubishi, Wolfspeed (Cree), Rohm, Infineon gibi firmaların dışında Semikron, UnitedSiC, Microsemi, SanRex, Panasonic, Fuji gibi firmalar da SiC MOSFET anahtarlar üzerine çalışmalar yapmaktadır [45].



Şekil 2.1.4. SiC MOSFET modül üreticileri ve örnekleri ([45]'ten esinlenilmiştir)

2.2. Paketleme ve Paketleme Basamakları

Yonga, alt katman ve elektriksel terminaller arasında bağlantı yapılarak bileşen oluşturulmasına paketleme denir. Paketlemenin birden çok önemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki mekanik, kimyasal ve çevresel etmenlere (titreşim, nem, toz vs.) karşı anahtarlama elemanını korumasıdır. Farklı gerilim seviyesine sahip bölgeler arasındaki elektriksel izolasyonun sağlanması, ısı transferinin gerçekleştirilmesi ve radyasyona karşı dayanımın artırılmasına da yardımcı olmaktadır. Ayrıca anahtarlama elemanının dış arayüze açılmasını ve elektriksel bağlantısını gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Paketleme, sistemin;

- Çalışma sıcaklığını, gerilimini, frekansını,
- Parazitik endüktans ve kapasitans değerini,
- Anahtarlama ve iletim kaybını,
- Elektromanyetik uyumluluğunu belirler.

Klasik paketleme yöntemleri SiC güç modüllerinin olumlu yanlarını sınırlamaktadır. Bu yüzden paket yapılarının geliştirilmesi ile SiC güç modüllerinden tam performans alınabilir.

Güç elemanlarından olan anahtarların paket yapıları incelenecek olursa temelde iki ayrı paketleme teknolojisi bulunmaktadır. Bunlar ayrık (İng, discrete) ve modül (İng, module) paket yapılarıdır. Kısaca özetlenecek olursa ayrık paket (örneğin TO247, TO263) içerisinde bir adet yonga bulunmaktadır. Modül paket yapısı ise akım taşıma kapasitesinin

arttırılması için birden çok yonga içermektedir. Ayrık paketin üretim basamaklarından bu kısımda kısaca bahsedilmiştir. Modül paketleme basamakları ise detaylı olarak bir sonraki kısımda anlatılmıştır. Ayrık paketin üretim basamakları sıralandığında ilk olarak izolasyon ihtiyacının olup olmadığı belirlenir. İzolasyon ihtiyacı olan paketlerde yonganın yerleştirildiği yüzey için Al_2O_3 gibi yalıtkan malzemeler kullanılabilirken izolasyon ihtiyacı olmayan paketlerde ise doğrudan metal plakaya yerleştirilmektedir. Bu işlemle yonganın alt yüzeyi hem termal hem de elektriksel iletkenliği sağlanmaktadır. Ardından yonganın üst yüzeyindeki terminallerle (örneğin kapı, kaynak) paketin ilgili elektriksel terminalleri arasındaki bağlantılar gerçekleştirilir. Terminaller arasındaki bağlantılar gerçekleştirildikten sonra da çalışma gerilimine ve ortamına göre izolasyon malzemesi ile doldurulabilmektedir ve paketin dış kılıfının takılmasıyla paketleme tamamlanmaktadır.

Modül paketleme ise 5 temel kısımdan oluşmaktadır [20]. Bunlar;

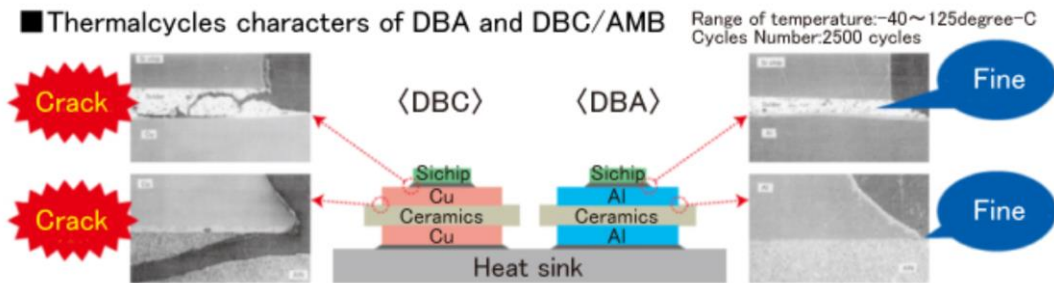
- Alt Katman Seçimi/İşlenmesi
- Yonga Bağlama
- Tel/Şerit Bağlama
- Dekuplaj Kondansatör (İng, decoupling capacitor) Entegrasyonu
- Kapsülleme Malzemesinin Uygulanması

2.2.1. Alt Katman Seçimi/İşlenmesi

Alt katman, izolasyon malzemesinin (örneğin Al_2O_3) bir veya iki yüzeyinin metal (örneğin Al veya Cu) ile kaplanması sonucu oluşmaktadır. Seramik malzemeler dayanıklılığı ve termal iletkenliği nedeniyle izolasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Seramik malzemeler arasında Al_2O_3 ve AlN en yaygın kullanılan bileşiklerdir [46]. Al_2O_3 seramik alt katmanlar maliyet açısından en uygun malzemedir. Fakat termal iletkenliği AlN bileşiğine göre daha düşüktür. AlN bileşiğinin termal iletkenliği Al_2O_3 bileşiğine göre yaklaşık 5 kat daha fazladır. Diğer önemli seçim parametresi de termal genleşme katsayısıdır. SiC bileşiğinin termal genleşme katsayısı $4 \times 10^{-6}/K$ değerinde olup [47] seçilen alt katman malzemesi ile kullanılan anahtarlama elemanının benzer termal genleşme katsayısına sahip olması ürün güvenilirliği açısından önem arz etmektedir [48]. Anahtarlama elemanları çalışma anında anahtarlama ve iletim kayıpları nedeniyle ısınmaktadır ve bu ısıyı seramik alt katman üzerinden soğutucu plakaya aktarmaktadır. Isı aktarımı sırasında anahtarlama elemanı ile birlikte seramik alt

katman da ısınmaktadır ve ısınan malzemeler termal genişleme katsayısına bağlı olarak genişlemektedir. Eğer anahtarlama elemanı ile alt katman malzemesi benzer termal genişleme katsayısına sahip olmazsa anahtarlama elemanında çatlamalara neden olabilir. AlN bileşiğinin termal genişleme katsayısı SiC bileşiğine daha yakın olması tercih edilme nedenlerinden biridir. AlN seramik alt katmanın dezavantajı ise Al₂O₃ seramik alt katmana göre daha pahalı olmasıdır. Fakat AlN malzemesinin kullanımının artması ile maliyet açısından da daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Seramik malzemelerin yüzey kaplaması da diğer önemli seçim kriterlerindedir. Seramik malzemenin yüzeyine kaplanan metal plakadan yüksek akımlar geçtiği için elektrik iletkenliğinin fazla olması gerekmektedir. Bu nedenle standart kartlara kıyasla alt katman yüzeyindeki metal plakalar daha kalın olup daha yüksek akım taşıma kapasitesine sahiptir. Alt katman türü kaplama malzemesi, kaplama yöntemi gibi etmenler nedeniyle farklılık göstermektedir. Kaplama malzemesine göre ayrılacak olursa doğrudan bağlamalı bakır (İng, direct bonding copper, DBC) ve doğrudan bağlamalı alüminyum (İng, direct bonding aluminum, DBA) bulunmaktadır. DBC tipindeki alt katmanların tek veya iki yüzeyi bakırla; DBA tipindeki alt katmanlarda ise alüminyumla kaplanmaktadır. DBA tipindeki alt katman malzemeler termal döngü ömrü açısından DBC alt katmana kıyasla daha uzun ömürlü ve güvenlidir [49]. Şekil 2.2.1’de DBC ve DBA tipindeki alt katmanların termal karakteristiği gösterilmiştir. 2500 kez “-40°C/+125°C” aralığında sıcaklık değişimi uygulandığı zaman DBC alt katmanlar yüzeylerinde kırılmalar gözlenirken DBA alt katmanlarda ise herhangi bir kırılma gözlemlenmemiştir [49]. DBA alt katmanın bu avantajına karşılık maliyeti ve yeterli performansı nedeniyle DBC alt katman daha çok tercih edilmektedir [50].

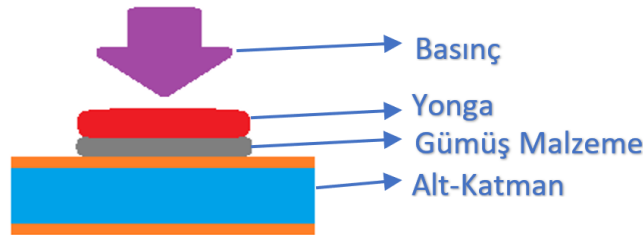


Şekil 2.2.1. DBC ve DBA alt katman termal karakteristiki karşılaştırması [49]

2.2.2. Yonga Bağlama

Anahtarlama elemanının alt katman üzerine farklı yöntemler kullanılarak yapıştırılması işlemine yonga bağlama denir. Bu işlem ile termal iletkenlik sağlanıp anahtarlama elemanında oluşan ısının alt katmana aktarılması hedeflenmektedir. Bazı uygulamalarda ise termal iletkenlik özelliğinin yanında elektriksel iletkenlik amacıyla da kullanılmaktadır.

Yonga bağlama işleminde lehim alaşımlar (İng, solder alloy) veya gümüş içerikli macun gibi malzemeler kullanılabilir. Gümüş, yüksek erime noktası (961°C), çok daha iyi termal iletkenlik (250W/mK) ve yüksek elektrik iletkenlik (41MS/m) özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Miric vd. yaptığı çalışmada yeni paketleme teknolojilerinde SnAg lehim alaşımı ile gümüş macun karşılaştırması verilmiştir [51]. Lehim alaşımının çalışma sıcaklığı 200°C seviyelerindeyken gümüş macun ile bu değer 400°C seviyeleri geçmektedir. Ayrıca elektrik ve termal iletkenlik açısından da lehim alaşımına göre avantajlarını gözler önüne sermektedir [51]. Gümüş macunlar basınçlı veya basınçsız sinterleme yöntemi ile uygulanabilmektedir. Basınçsız gümüş sinterleme (İng, silver sintering) ısı altından herhangi bir basınç uygulamadan, basınçlı gümüş sinterleme yöntemi ile belirli bir basınç ve sıcaklık altında gümüş elementi doğal yollarla topaklaşır. Şekil 2.2.2’de basınçlı gümüş sinterleme uygulamasının gösterimi verilmiştir.



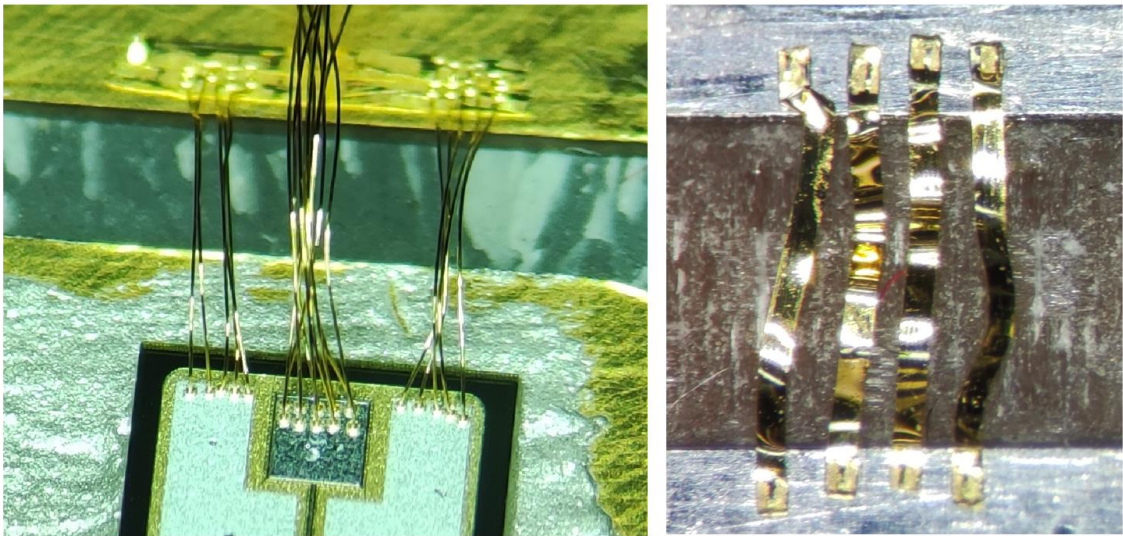
Şekil 2.2.2. Basınçlı gümüş sinterleme uygulaması

2.2.3. Tel/Şerit Bağlama

Tel/şerit bağlama işlemi yonganın üst yüzeyi ile paket terminalleri arasındaki elektriksel bağlantıların yapılmasıdır. Kullanılan malzemeye göre sınıflandırılacak olursak altın (Au), bakır (Cu) ve alüminyum (Al) gibi iletkenler kullanılmaktadır. Alüminyum, ticari ürünlerde yaygın olarak kullanılan iletken malzemelerden biridir [52]. Ayrıca sağlamlığı ve işlenebilirlik özelliklerinden dolayı 100µm ve üzeri kalın teller (İng, heavy wire) üretilip daha yüksek akım taşınabilmektedir. Yüksek akım taşıma özelliğiyle de güç elektroniği uygulamaları için önemli bir alternatiftir. Bakır ise alüminyum veya altına

göre daha yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptir. Bu özellikleri ve düşük maliyetinden dolayı bakır da tercih edilen diğer iletken türünden biridir. Son olarak altın ile genellikle 100 μm 'den daha küçük çapta ince teller (İng, fine wire) üretilmekte olup genellikle düşük akım uygulamalarında tercih edilmektedir [53].

İletkenin bağlama yöntemine göre sınıflandırılacak olursa tel bağlama, şerit bağlama (İng, ribbon bonding) ve kalıp bağlama (İng, clip bonding) teknolojileri bulunmaktadır. Tel bağlama teknolojisi telin farklı yöntemlerle metale bağlanmasıdır. En eski, kolay ve uygun maliyetli yöntemdir. Şerit bağlama teknolojisi, tel bağlama ile benzer olup iletken tel yerine iletken şerit kullanılmaktadır. Tel yerine iletken yüzeyi daha fazla olan şerit ile daha yüksek akımlar taşınabilir. Ayrıca şerit ile bağlama yüzeyi arttığı için daha yüksek güç döngü kapasitesine (İng, power cycling capacity) sahiptir. Bununla birlikte oluşturulan bağın güvenilirliği de artmaktadır [54]. Kalıp bağlama teknolojisi ise iletken kalıbın doğrudan yonganın üst yüzeyine lehimlenmesidir ve bağlamasız (İng, bondless) paketlemeye örnektir. Tel ve şerit bağlama yöntemleri yerine kalıp bağlama yönteminin kullanılmasıyla yonganın üst yüzeyi tamamen iletken malzeme ile bağlandığı için iletkenin yüzey alanı en üst seviyelere çıkmaktadır ve parazitik endüktans/direnç değerlerini düşürmektedir. Ayrıca SanRex firması ile Heraeus firması kalıp bağlama teknolojisinin avantajlarını kullanmaktadır [55, 56]. Fakat uygulaması daha zor olduğu için üretim açısından dezavantajlıdır. Optik mikroskop altında elde edilen “1mil (25.4 μm)” tel bağlama ve “10mil x 1 mil (254 μm x 25.4 μm)” şerit bağlama örnekleri Şekil 2.2.3'te sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 2.2.3. Tel bağlama (solda) ve şerit bağlama (sağda) örnekleri

Farklı çaptaki alüminyum (Al) ve altın (Au) tellerin akım taşıma kapasitesi Çizelge 2.2.1’de gösterilmiştir [57]. Çizelgede verilen 1 mil Au tel ile 0.6A seviyelerinde akım taşınabilirken 20 mil Al tel ile 50A seviyelerine kadar akım taşınabilmektedir. Aynı çizelgedeki “Önerilen Bağ Yüzeyi” sütununda ise tel bağlama sırasında kullanılan telin ezilmesiyle bağlantı kurulduğu için önerilen bağlantı yüzeyinin tel çapından yaklaşık 3-4 kat daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.2.1. Farklı çaptaki Al ve Au tellerin akım taşıma kapasitesi [57]

Tel Tipi	Çap (mil)	Çap (μm)	Tel Kesit Alanı (mm^2)	Öz Direnç ($\Omega/\text{inç}$)	Azami Akım (A)	Önerilen Bağ Yüzeyi (mil x mil)
Altın	1.0	25.4	0.79	1.160	0.6-0.7	4x4
	2.0	50.8	3.14	0.294	1.6-2.0	8x8
Alüminyum	1.0	25.4	0.79	1.330	0.27-0.30	3.5x3.5
	2.0	50.8	3.14	0.335	1.0-1.2	6x8
	5.0	127.0	19.63	0.054	5.0-6.0	15x25
	10.0	254.0	78.54	0.013	16-18	25x40
	15.0	381.0	176.71	0.006	20-35	40x60
	20.00	508.0	314.16	0.003	50-60	50x80

2.2.4. Dekuplaj Kondansatör Entegrasyonu

IGBT anahtarlara kıyasla SiC MOSFET anahtarlar yüksek anahtarlama hızına sahiptir. Anahtarlama hızı arttıkça devredeki parazitik endüktanstan dolayı oluşan gerilim tepe değeri de artmaktadır. Artan tepe gerilim değeri de hem kayıpların artmasına hem de anahtarın yanlış çalışmasına/zarar görmesine neden olabilir. Buna benzer çevresel etmenlere karşı modülün bağımsızlığını arttırılması için modül içerisine dekaplaj kondansatörünün eklenmesinin avantajları bulunmaktadır. Fakat modül üretimi sırasında yeni bir basamak ekleneceği için üretim süresinin artmasına da neden olabilmektedir.

Çok katmanlı seramik kondansatörler (İng, multilayer ceramic capacitor, MLCC) hem yüksek akım kapasitesine sahiptir hem de yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir [58]. Bu özellikleri sayesinde modül içerisindeki kondansatör entegrasyonunda, MLCC türündeki kondansatörler kullanılabilir. Anahtarlama sırasında oluşan akım değişimi, parazitik endüktans ile gerilimdeki aşımara neden olmaktadır. Kondansatör ise gerilimdeki bu dalgalanmanın bastırılmasını sağlamaktadır. Gerilimdeki dalgalanmanın temel kaynağı anahtar olduğu için de dekaplaj kondansatörün modül içerisinde anahtara olabildiğince yakın olması, gerilimdeki dalgalanmanın kaynağında çözülmesini sağlamaktadır.

Gerilimdeki dalgalanmanın düşürülmesiyle hem elektromanyetik girişimler hem de anahtarlama kayıpları azaltılabilmektedir.

2.2.5. Kapsülleme Malzemesinin Uygulanması

Modül paketlemenin son aşamasında, farklı gerilim seviyesine sahip iletken yüzeyler arasında herhangi bir gerilim atlamasının oluşmaması ve modülün çalışabileceği gerilim seviyesini arttırmak için kapsülleme malzemeleri kullanılmaktadır. İçi hava ile dolu olan modül, izolasyon seviyesi yüksek olan kapsülleme malzemesiyle doldurur. Kapsülleme malzemesinin akışkan yapısı sayesinde de modül içerisine eşit bir şekilde dağılmaktadır. Kapsülleme malzemesi, izolasyon gerilimini arttırmasının yanında nem, toz gibi çevresel etmenlere karşı da korumaktadır. Ticari IGBT, MOSFET gibi modüllerin içerisinde kullanılan kapsülleme malzemeleri genellikle 200°C'ye kadar dayanabilmektedir [20]. SiC MOSFET anahtarlar ise daha yüksek sıcaklıklarda çalışabildiği [6, 19] için kapsülleme malzemesinin yüksek sıcaklıklarda herhangi bir bozunuma uğramadan çalışabilmesi önem arz etmektedir.

SiC MOSFET anahtarların çalışma frekansı IGBT gibi Si tabanlı anahtarlardan çok daha fazla olabilmektedir. Anahtarlama frekansı arttığı zaman birim zamandaki (örneğin 1 saat içerisindeki) gerilim değişim sayısı artmaktadır. Ayrıca anahtarlama süresi de kısaldığı için gerilim değişim hızı ($\Delta V/\Delta t$) da artıp yüksek elektrik alanlar oluşturmaktadır. Bu zorlayıcı etmenler sonucunda oluşan streslere modül içerisindeki diğer ürünlerle birlikte kapsülleme malzemesi de maruz kalmaktadır. Bu nedenle seçilen kapsülleme malzemesinin yüksek bozulma gerilimine sahip olması da önemli parametrelerdendir.

2.3. Malzeme Seçimi

Bu başlıkta modül paketlemede ihtiyaç duyulan malzemelerin seçiminden ve gerçekleştirilen kayıp ile termal analizlerden bahsedilmiştir. Modül paketleme sırası göz önüne alındığında malzeme seçimleri ve analizler; “Yonga Seçimi”, “Alt Katman Seçimi”, “Yonga Bağlama”, “Tel/Şerit Bağlama”, “Kapsülleme Malzemesi” ve “Analizler” başlıklarında anlatılmıştır.

2.3.1. Yonga Seçimi

Bu kısımda SiC MOSFET ve diyot yonga üreticileri araştırılmıştır. Ürünleri araştırılan firmalar ve ürün özellikleri Çizelge 2.3.1’de gösterilmiştir [59–77]. Bu çizelgede hem SiC MOSFET hem de SiC diyot ürünleri gösterildiği için “SiC M/D” sütununda MOSFET

“M”, diyot ise “D” ile belirtilmiştir. Benzer şekilde “ V_{ds}/V_f ” sütunundaki değerler de sırasıyla MOSFET’in iletim anındaki akaç-kaynak arasındaki gerilim düşümü (V_{ds}) ile diyotun iletim anındaki gerilim düşümüdür (V_f). Yonganın taşıyabileceği sürekli akım değerleri “Akım Seviyesi” sütununda verilmiştir. MOSFET yongalar, iletme geçtikten (İng, turn on) sonra belirli bir direnç göstermektedir. Bu direnç değeri “ $R_{ds(on)}$ ” olarak verilmiştir. MOSFET’in kapı-kaynak arası dayanabileceği azami negatif ve pozitif gerilim değerleri “Azami V_{gs} ”, iletme girmesi için gerekli eşik gerilimi de “ $V_{gs(th)}$ ” sütunlarında verilmiştir. MOSFET yongaların giriş (İng, input), çıkış (İng, output) ve ters transfer (İng, reverse transfer) kapasitans değerleri sırasıyla “ C_{iss} ”, “ C_{oss} ” ve “ C_{rss} ” olarak gösterilmiştir [78].

Çizelge 2.3.1. SiC MOSFET ve diyot yongaların karşılaştırması

Marka	Model	SiC M/D	Gerilim Seviyesi (V)	Akım Seviyesi (A)	$R_{ds(on)}$ Direnci (m Ω)	Azami V_{gs} (V)	$V_{gs(th)}$ (V)	C_{iss} (pF)	C_{oss} (pF)	C_{rss} (pF)	V_{ds}/V_f (V)	Çalışma Sıcaklığı (°C)
ON Semi.	NTC160N120 SC1 [59]	M	1200	10	160	-15/+25	2.7	665	50	5	4	-55/+175
ON Semi.	NTC080N120 SC1 [60]	M	1200	20	80	-15/+25	2.7	1112	80	6.5	4.0	-55/+175
YesPower T.	PM130N120L B [61]	M	1200	20	130	-7/+24	2.8	1000	70	15	4.5	-55/+175
Cree/Wolfspeed	CPMF-1200-S160B [62]	M	1200	28	160	-5/+25	2.5	928	63	7.5	3.5	-55/+150
Cree/Wolfspeed	CPM3-1200-0075A [75]	M	1200	30	75	-8/+19	2.5	1390	58	2	4.5	-55/+175
ON Semi.	NTC040N120 SC1 [63]	M	1200	40	40	-15/+25	2.7	1781	140	12	3.8	-55/+175
Rohm	S2301 [64]	M	1200	40	80	-10/+26	2.8	2080	77	17	4.6	-55/+175
BasicSemi	BC1M080120 [65]	M	1200	42	80	-10/+25	2.9	2224	108	25	6.7	-40/+150
Cree/Wolfspeed	CPMF-1200-S080B [66]	M	1200	50	80	-5/+25	2.5	1915	120	13	3.5	-55/+150
ON Semi.	NTC020N120 SC1 [67]	M	1200	60	20	-15/+25	2.7	2890	260	22	3.7	-55/+175
Wolfspeed	CPM3-1200-0032A [76]	M	1200	63	32	-8/+19	2.5	3250	130	8	4.6	-55/+175
Rohm	S4102 [68]	M	1200	72	30	-10/+26	4.2	2222	180	72	3.2	-55/+175
Rohm	S4103 [69]	M	1200	95	22	-10/+26	4.2	2879	237	108	3.2	-55/+175
Wolfspeed	CPM3-1200-0021A [70]	M	1200	100	21	-8/+19	2.5	4818	180	12	4.6	-55/+175
Wolfspeed	CPM3-1200-0016A [71]	M	1200	112	16	-8/+19	2.5	5777	230	12.5	4.6	-55/+175
Wolfspeed	CPM3-1200-0013A [72]	M	1200	149	13	-8/+19	2.5	7560	284	18	4.6	-55/+175
Wolfspeed	EPW4-1200-S020A [77]	D	1200	20	-	-	-	-	-	-	1.5	-55/+175
BasicSemi	BC1D20120 [73]	D	1200	20	-	-	-	-	-	-	1.5	-55/+175
BasicSemi	BC1D50120 [74]	D	1200	50	-	-	-	-	-	-	1.5	-55/+175

Azami çalışma sıcaklığı +150°C olan SiC MOSFET yongalar yerine +175°C olan yongalar değerlendirmeye alınmıştır. Ardından azami kapı-kaynak gerilimleri incelenmiştir. Negatif ve pozitif değerlikte diğerlerine göre daha düşük olan (-8V/+19V) Wolfspeed'in ürünleri dikkat çekmektedir. Son karşılaştırma parametresi olarak $R_{ds(on)}$ direnci incelenmiştir. SiC MOSFET yongalar iletim anında $R_{ds(on)}$ direncine eşittir. Direnç üzerinden geçen akım nedeniyle de iletim kayıpları oluşmaktadır. Bu iletim kaybı direnç ile doğrusal, üzerinden geçen akımın da karesiyle doğru orantılıdır. Bu nedenle " $R_{ds(on)}$ " direncinin düşük olması düşük iletim kayıpları elde etmek için önemlidir. Fakat Çizelge 2.3.1 incelendiğinde akım seviyesi arttıkça " $R_{ds(on)}$ " direnç değeri düşmektedir. Bu nedenle farklı markaların, benzer akım değerindeki yongaların dirençleri kendi içlerinde değerlendirilmiştir. Daha kolay karşılaştırma yapılması için Çizelge 2.3.1'deki akım seviyesi değeri küçükten büyüğe sıralanmıştır. 20A-30A aralığındaki yongalar karşılaştırıldığında en düşük iletim direncine sahip MOSFET yonga "Wolfspeed/CPM3-1200-0075A" yongasıdır. 40A-50A aralığında "ON Semi./NTC040N120SC1", 60A-72A aralığında "ON Semi./NTC020N120SC1" ve 95A-112A aralığında da "Wolfspeed/CPM3-1200-0016A" numaralı ürünler en küçük $R_{ds(on)}$ direncine sahiptir.

Diyotlar için iletim anındaki gerilim düşümü olan V_F gerilimi önemli parametrelerden biridir. V_F gerilim değerinin düşük olması hem diyotun daha erken iletme girmesine hem de daha düşük iletim kaybının oluşmasını sağlamaktadır. Çizelge 2.3.1'deki diyotlar incelendiğinde de tüm diyotların V_F değerinin 1.5V olduğu görülmektedir.

Wolfspeed'in 1200V gerilime sahip SiC MOSFET ve SiC Schottky diyot yongaların özellikleri bu kısımda detaylandırılmıştır. Çizelge 2.3.2'de SiC MOSFET ve diyotların boyutları, alt/üst yüzey kaplaması, gerilim/akım seviyeleri ve yonga görselleri gibi özellikler verilmiştir [75–77, 79–81]. "SiC M/D" sütununda MOSFET "M", diyot "D" ile belirtilmiştir. Yongaların en, boy ve yükseklik değerleri "Boyutlar" sütununda verilmiştir. Yongaların alt ve üst yüzeyi farklı elementlerle kaplanabilmektedir. "Üst Yüzey" ve "Alt Yüzey" sütunlarında hangi element veya bileşikle (Al, Ni/Ag veya Ni/Au) kaplandığı; yongaların geçirebileceği sürekli akım değerleri "Sürekli Akım" sütununda gösterilmiştir. Yongaların dayanabileceği azami gerilim MOSFET'ler için " $V_{ds(max)}$ ", diyotlar için " V_F "; MOSFET yongaların iletim anındaki dirençleri " $R_{ds(on)}$ ", diyotların iletim anındaki gerilim düşümleri " V_F " sütunlarında verilmiştir. Tek çizelgede

hem MOSFET hem diyot yongaların özellikleri verilir MOSFET (M) için “ $V_{ds(max)}$ ” ve “ $R_{ds(on)}$ ”, diyot (D) için “ V_r ” ve “ V_f ” değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 2.3.2. SiC MOSFET ve SiC Schottky diyot yongaların özellikleri

Yonga Üretici Parça Numarası	SiC M/D	Boyutlar (E x B x Y) mm	Üst Yüzey	Alt Yüzey	Sürekli Akım	$V_{ds(max)} / V_r$ Gerilim	$R_{ds(on)} / V_f$
CPM3-1200-0075A [75]	M	2.8x2.5x0.18 mm	Al	Ni/Au	30A	1200V	75 mΩ
CPM3-1200-0032A [76]	M	3.7x4.1x0.18 mm	Al	Ni/Au	63A	1200V	32 mΩ
CPW4-1200-S020B [79]	D	3.1x3.1x0.38 mm	Al	Ni/Ag	20A	1200V	1.5V
CPM2-1200-0080A [80]	M	3.1x3.4x0.18 mm	Al	Ni/Au	36A	1200V	80 mΩ
CPW5-1200-Z050B [81]	D	4.9x4.1x0.38 mm	Al	Ni/Ag	50A	1200V	1.6V
EPW4-1200-S020A [77]	D	3.1x3.1x0.38 mm	Al	Ni/Au	20A	1200V	1.5V

Bu başlık altında detaylı anlatıldığı gibi +175°C’de çalışabilen, düşük $R_{ds(on)}$ direncine sahip SiC MOSFET seçilmesine dikkat edilmiştir. Farklı akım aralığındaki en düşük dirence sahip anahtarlar aşağıda verilmiştir.

- 20A-30A → Wolfspeed/CPM3-1200-0075A
- 40A-50A → ON Semi./NTC040N120SC1
- 60A-72A → ON Semi./NTC020N120SC1
- 95A-112A → Wolfspeed/ CPM3-1200-0016A

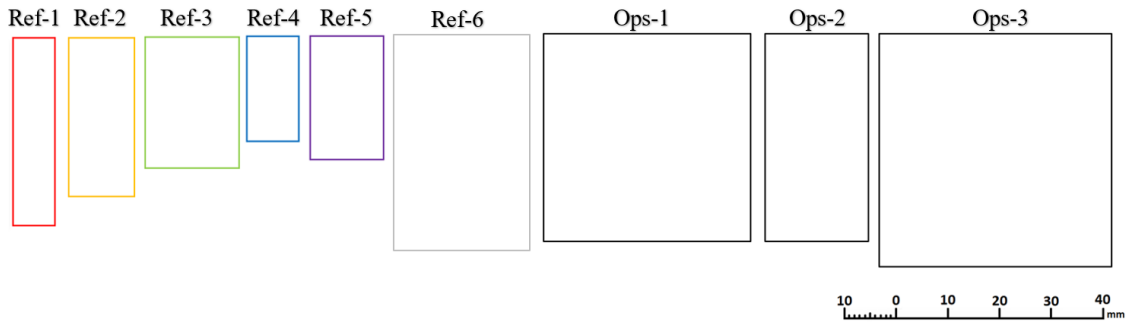
Tez kapsamında konsept doğrulaması yapılacağı için düşük akımlı modül tasarlanması hedeflenmiştir. Bu nedenle 20A-30A aralığında sürekli akıma sahip SiC MOSFET yongalar incelendiğinde “Wolfspeed/CPM3-1200-0075A” parça numaralı ürün tercih edilmiştir.

“CPM3-1200-0075A” numaralı SiC MOSFET’in gövde diyotu (İng, body diode) V_{SD} değeri 4.5V’tur [75]. “EPW4-1200-S020A” numaralı SiC Schottky diyotun ise V_F değeri 1.5V’tur [77]. Harici SiC Schottky diyot yerine SiC MOSFET’in gövde diyotu kullanılması durumunda daha yüksek kapasitans ve daha yüksek V_F gerilimi nedeniyle daha yüksek anahtarlama kayıplarının oluşmasına neden olmaktadır [82]. Bu nedenle SiC MOSFET paraleline ters-paralel diyot olarak “EPW4-1200-S020A” numaralı SiC Schottky diyot kullanılmıştır.

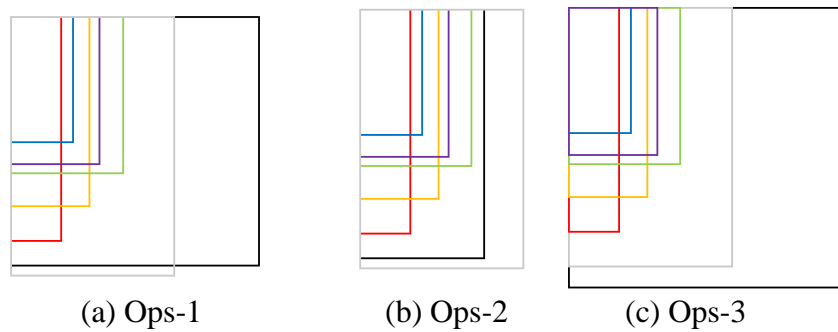
2.3.2. Alt Katman Seçimi

“2.2.1. Alt Katman Seçimi” başlığında seramik malzemeler arasında en yaygın kullanılanların Al_2O_3 ve AlN bileşiklerin olduğu, Al_2O_3 seramik alt katmanların maliyet açısından daha uygun, fakat termal iletkenlik ve CTE katsayısı açısından AlN seramik alt katmanların daha yüksek performanslı olduğu belirtilmiştir.

Tez kapsamında üretilen alt modülün anahtarlama performansı (anahtarlama süresi ve anahtarlama kayıpları) incelendiği için kısa süreli anahtarlama gerçekleştirilmiştir. Uzun süreli anahtarlama testleri gelecek çalışmalarda gerçekleştirilebileceği için bu başlık altında alt katman boyutunun belirlenmesinde izlenecek yol ve yöntemlere yer verilmiştir. Huang vd. tarafından yapılan çalışmada farklı paket yapılarındaki yarım köprü modüllerinin boyutsal kıyaslamasına yer verilmiştir [32]. Farklı boyutlardaki ölçekli alt modül görselleri Şekil 2.3.1’de gösterilmiştir. Literatürdeki bazı alt modül boyutları Ref-1 (36.0mm x 8.1mm), Ref-2 (30.4mm x 12.6mm), Ref-3 (25.1mm x 18.0mm), Ref-4 (20.1mm x 10.0mm) ve Ref-5 (23.7mm x 14.2mm) ile isimlendirilmiş olup aynı çalışmada hazırlanan alt modül ise Ref-6 (41.5mm x 26.3mm) ile gösterilmiştir. Seçilmesi planlanan üç farklı boyuttaki opsiyonlar da “Ops-1 (40mm x 40mm), Ops-2 (40mm x 20mm), Ops-3 (45mm x 45mm)” olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3.1. Ölçekli alt katman boyutları ve isimlendirmeleri



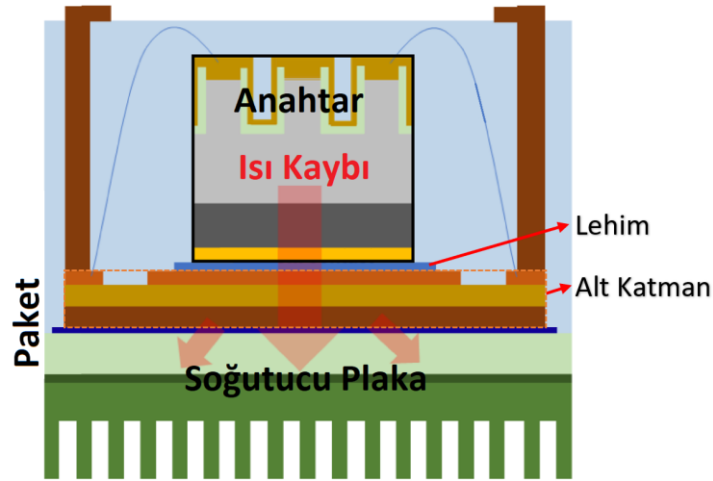
Şekil 2.3.2. Referans alt katmanlar ile farklı alt katman opsiyonlarının karşılaştırılması

Şekil 2.3.2’de üç farklı boyuttaki opsiyona altı farklı alt modül boyutu (Ref-1’den Ref-6’ya kadar) ayrı ayrı eklenerek karşılaştırılmıştır. Paylaşılan çizimler incelendiğinde tüm referanslar alt modülleri içinde barındıran opsiyonlar Ops-1 ve Ops-3’tür. Ops-1’in boyutu Ops-3’ten küçük olduğu ve alt modül boyutunun da küçük olması hedeflendiği için alt katman boyutu 40mm x 40mm (Ops-1) olarak seçilmiştir.

Alt katman boyutu da belirlendikten sonra yüzey kaplama türleri incelenmiştir. Tel bağlama işlemine daha uygun hale gelmesi için yüzeyin “ENEPIG (Ni+Pd+Au)” kaplanması tel bağlamayı güçlendiren ve güvenilirliğini arttıran yöntemlerden biridir [83]. Bu nedenle 40mm x 40mm boyutunda, çift tarafı bakır ve yüzeyi ENEPIG kaplı, Al₂O₃ seramik DBC alt katman temin edilmiştir.

2.3.3. Yonga Bağlama

Yarıiletkenlerin anahtarlama ve iletim anında oluşan, anahtarlama (İng, switching) ve iletim (İng, conduction) güç kayıpları (İng, power losses) ısıya dönüşüp yarıiletken sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu sıcaklık artışı anahtarın bağlandığı alt katmana, alt katmandan da soğutucu plakaya aktarılır ve anahtarın güç kayıpları sonucu oluşan ısının aktarımı sağlanmaktadır. Bahsedilen anahtar üzerinde oluşan ısı kaybının aktarımını Şekil 2.3.3’te gösterilmiştir [84].



Şekil 2.3.3. Anahtar üzerinde oluşan ısı kaybının aktarımını [84]

Anahtarın güç kayıpları sonucu oluşan ısı kaybının soğutucu plakaya aktarılması, yonga bağlama malzemesi (örneğin lehim alaşımlar) ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla yonga bağlama malzemesi ile ısı aktarımını sağlanması için seçilen lehim malzemesinin yüksek termal iletkenliği olması önemlidir. Yonganın alt yüzeyi ile alt katman arasında

elektriksel bağlantının olduğu uygulamalarda ise elektriksel iletkenlik özelliğine de dikkat edilmektedir.

Bir diğer önemli nokta ise termal genleşme katsayısıdır. Anahtar üzerinde oluşan sıcaklık değişimi sonucunda lehim malzemesi üzerinde de sıcaklık değişimi oluşmaktadır. Dolayısıyla anahtarla birlikte lehim malzemesi de sıcaklık değişimi sırasında genişip büzülmemektedir. Ürünlerin genleşme katsayısı birbirine yakın olmadığı zaman ürünlerin çatlayıp zarar görmesine neden olabilir [85]. Bu nedenle seçilen lehim malzemesinin termal genleşme katsayısının SiC MOSFET anahtara yakın değerlikte olması önemlidir.

Literatürde ve ticari ürünlerde yonga bağlama malzemesi olarak kalay-kurşun (SnPb) lehim alaşımları, kalay-gümüş-bakır (SnAgCu) gibi kurşunsuz lehim alaşımlar, altın-kalay (AuSn) alaşımlar veya gümüş (Ag) içerikli alaşımlar kullanılmaktadır [86, 87]. Gümüş içerikli alaşımlar düşük uygulama sıcaklığı, uygulama sonrasında yüksek erime noktası, yüksek bağlantı güvenilirliği (İng, joint reliability), kolay uygulanabilirliği, termal ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle tercih edilmektedir [87]. Fakat yüksek termal iletkenlik, yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek sıcaklıklara dayanımı nedeniyle gümüş sinterleme yöntemi de birçok çalışmada kullanılmaktadır [84, 88]. Kolay uygulanabilir, yüksek bağlantı güvenilirliği, termal ve elektriksel iletkenliği gibi özellikleri nedeniyle gümüş içerikli alaşım tercih edilmiştir. Gelecek çalışmalarda gümüş sinterleme yöntemi uygulanıp elektriksel ve termal performansı incelenebilir.

Yonga yerleştirilmesi için yarı otomatik veya tam otomatik yonga bağlama cihazları kullanılabilir [89–91]. Fakat bu cihazlar genellikle yüksek miktarda üretimi olan paketleme çalışmalarında veya seri üretim çalışmaları için uygundur. Tez çalışması kapsamında da sınırlı sayıda yonga yerleştirilmesi yapılacağı için yonga bağlama cihazının kullanılması tercih edilmemiştir. Tez çalışmalarında yonga yerleştirme ve bağlama işlemleri, hassas bir şekilde manuel olarak ASELSAN bünyesindeki laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir.

2.3.4. Tel/Şerit Bağlama

Ticari ürünlerin çoğunda kolay uygulanabilmesi ve uygun maliyetli olması nedeniyle tel bağlama teknolojisi tercih edilmektedir. Bazı uygulamalarda şerit bağlama veya kalıp bağlama teknolojisi de kullanılmaktadır [18]. Tel ve şerit bağlama teknolojileri benzer teknolojiler olup tel/şerit bağlama cihazına tel veya şerit eklenmesiyle çalışabilmektedir

[92–94]. Kalıp bağlama teknolojisi ise termal ve elektriksel açıdan daha avantajlı olmasına rağmen uygulama zorluğu nedeniyle tercih edilmemiştir. Tez kapsamında uygulama kolaylığı nedeniyle tel bağlama teknolojisi tercih edilmiştir. Bu kısımda tel bağlama için ihtiyaç duyulan tel kalınlığı ve farklı opsiyonlarda ihtiyaç duyulan tel adetleri detaylı olarak incelenmiştir.

Tez kapsamında üretilen alt modül, yarım köprü (İng, half bridge) yapısındadır. Yarım köprünün üst ve alt kollarında birer adet SiC MOSFET yonga kullanılmıştır. Seçilen SiC MOSFET yonga bilgileri “2.3.1. Yonga Seçimi” başlığında detaylı olarak verilmiştir. Kullanılan SiC MOSFET yonga 30A sürekli akaç akımına (İng, continuous drain current) sahip olup darbeli akaç akımı (İng, pulsed drain current) 80A değerindedir [75]. Darbeli akaç akım değeri yonganın üst sınırı olduğu için alt modülün taşıyabileceği azami akım değeri 60A olarak belirlenmiştir. Azami akım değeri için farklı çaptaki tellere göre kaç adet tel ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır. Farklı çaptaki Au ve Al tellerin akım taşıma kapasiteleri Çizelge 2.2.1’de verilmiştir. Çizelge 2.2.1’deki veriler kullanılarak Çizelge 2.3.3’teki “Birim Tel/Şerit Akım Taşıma Kapasitesi (A)” sütunu doldurulmuştur. Bu sütunda, kullanılan bir telin taşıyabileceği azami akım değeri verilmiştir. “60A Değerine Karşılık Tel/Şerit Sayısı” sütununda ise toplam 60A akım taşıma seviyesine ulaşmak için kaç adet şerit veya telin paralel bağlanması gerektiği hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere göre “250µm Al Tel” ile 4 adet paralel tel kullanarak elde edebileceğimiz akım değerini “25µm Au Tel” ile 100 adet paralel tel ile elde edilebilmektedir.

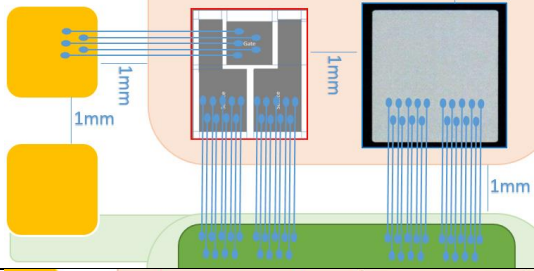
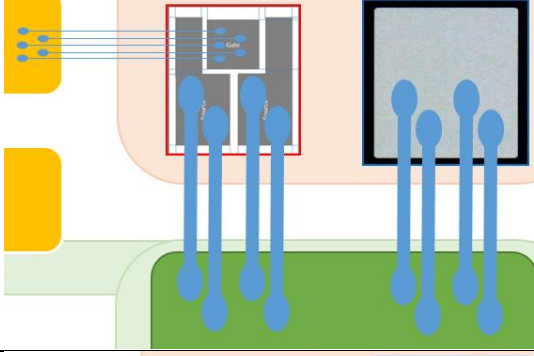
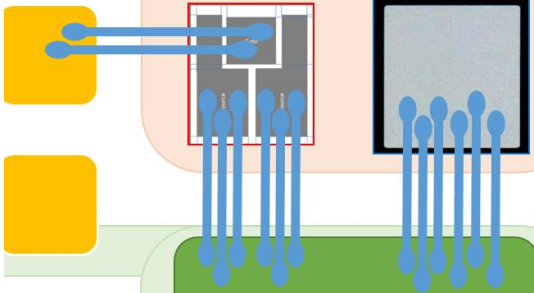
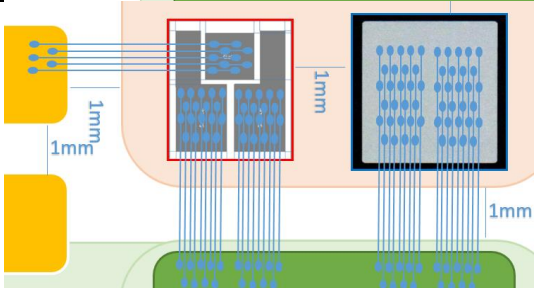
Çizelge 2.3.3. Tel/Şerit çapına karşılık tel/şerit sayısı

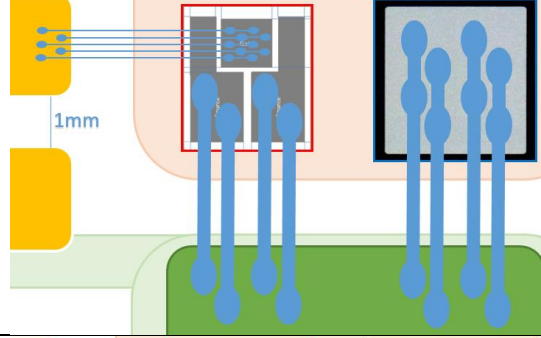
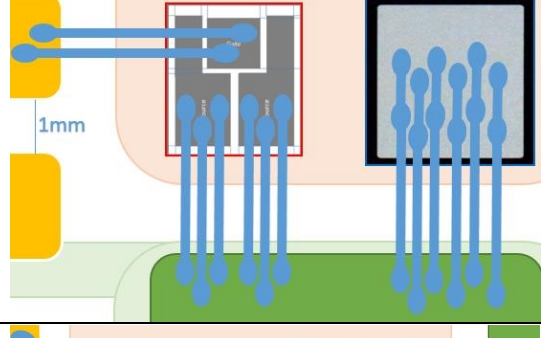
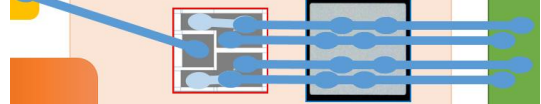
Tel/Şerit Çapı	Birim Tel/Şerit Akım Taşıma Kapasitesi (A) [57]	60A Değerine Karşılık Tel/Şerit Sayısı (Adet)
25µm Au Tel	0.6A	100
25µm Al Tel	0.3A	200
250µm Al Tel	16.0A	4
178µm x 25µm Al Şerit (≈38µm Al Tel)	0.6A	100
75µm Al Tel	2.0A	30
100µm Al Tel	3.5A	17

Bu kısımda tel, yonga ve alt katmanın gerçek boyuta göre oranlı çizimleri gerçekleştirilmiştir. Farklı opsiyonlar için tasarım, tel sayısı, tel uzunluğu, özelliği ve toplam akım değerleri Çizelge 2.3.4’te verilmiştir. Çizelgenin “Güç Hattı & Kapı Sürücü Hattı Tel Özelliği” sütununda ilk olarak MOSFET ve diyotun güç bağlantılarında (MOSFET için kaynak yüzeyine, diyot için anot yüzeyine) kullanılan tel sayısı ile telin

türü; “&” işaretinde sonra da MOSFET’in kapı yüzeyi bağlantısında kullanılan tel sayısı ve türü verilmiştir. Bağ adeti ve tel uzunluğu sütunlarında da ilgili tasarımda kullanılan MOSFET ve diyot için sırasıyla ihtiyaç duyulan toplam bağ adeti ve tel uzunluğu bulunmaktadır. Çizelgenin son sütunundaki toplam akım değeri de Çizelge 2.3.3’te verilen ilgili telin akım taşıma kapasitesi ile paralel bağlanan tel sayısının çarpımından hesaplanmıştır. Örneğin 25µm Al telin akım taşıma kapasitesi (0.3A) ile paralel bağlanan tel sayısı (18 adet) çarpıldığında toplam akım değeri 5.4A’dır.

Çizelge 2.3.4. Farklı tasarım seçenekleri ve özellikleri

OP NO	Tasarım	1 MOSFET & 1 Diyot Bağ (Bond) Adeti	1 MOSFET & 1 Diyot Tel Uzunluğu	Güç Hattı & Kapı Sürücü Hattı Tel Özelliği	Toplam Akım
OP 1.1		72 & 10	105mm & 19mm	18× 25µm Al tel & 5× 25µm Al Tel	4.9A & 1.35A
Op 1.2		16 & 10	28mm & 19mm	4× 250µm Al tel & 5× 25µm Al Tel	64A & 1.35A
Op 1.3		24 & 4	36mm & 8mm	6× 178µm×25µm Al şerit & 2× 178µm×25µm Al şerit	3.6A & 1.2A
Op 2.1		126 & 15	139mm & 21mm	18× 25µm Al tel & 5× 25µm Al Tel	4.9A & 1.35A

Op 2.2		20 & 15	33mm & 21mm	4× 250µm Al tel & 5× 25µm Al Tel	64A & 1.35A
Op 2.3		30 & 4	42mm & 8mm	6× 178µm ×25µm Al şerit & 2× 178µm ×25µm Al şerit	3.6A & 1.2A
OP 3.1		18 & 2	34mm & 5mm	4× 250µm Al tel & 1× 250µm Al tel	64A & 16A

Çizelge 2.3.4'te verilen tasarımlarda SiC MOSFET yongaların üzerine sığabileceği kadar tel bağlanmıştır. Bu çizelgedeki 3 farklı telin paralel bağlanması sonucunda taşıyabildiği azami akım değerleri sırasıyla verilmiştir. Çizelgede verilen tasarımlarda 25µm'lik Al tellerin paralel bağlanması ile yaklaşık 5A, 78µm×25µm'lik Al şerit tel ile yaklaşık 4A, 250µm Al telin ile 64A seviyelerindedir. Çizelge 2.3.3'teki "25µm Au Tel" ve "25µm Al Tel" incelendiğinde Au telin akım taşıma kapasitesi Al telin yaklaşık iki katıdır. Bu nedenle 25µm'lik Au tellerin paralel bağlanmasıyla da elde edilen toplam akım taşıma kapasitesi 10A seviyelerindedir. Tez kapsamında kullanılan SiC MOSFET anahtarın ise sürekli akımı 30A, darbeli akımı ise 80A değerinde olduğundan bahsedilmiştir. Tellerin hesaplanan toplam akım taşıma kapasiteleri incelendiğinde 250µm'lik Al tel ihtiyacımızı karşılamaktadır.

Çizelge 2.3.4'te yarım köprünün üst kısmı (İng, half bridge high side) için ihtiyaç duyulan toplam bağ adeti ve tel uzunluğunu göstermektedir. Bir yarım köprüde hem alt kısım (İng, half bridge low side) hem de üst kısım olduğu için toplam değer, Çizelge 2.3.4'te verilen bağ ve tel uzunluk değerlerinin iki katıdır. Yarım köprü için hesaplanan toplam bağ sayısı ve tel uzunluğu Çizelge 2.3.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.3.5 Farklı tasarım bağ sayısı ve toplam kullanılacak tel uzunlukları

OP No	Tel	Bağ (Bond) Sayısı	Toplam Tel Uzunluğu
OP1.1	25µm Al tel	576	840mm
	25µm Al tel	80	152mm
OP2.1	25µm Al tel	1008	1112mm
	25µm Al tel	120	168mm
OP1.3	178µm×25µm Al şerit	216	288mm
	178µm×25µm Al şerit	32	64mm
OP2.3	178µm×25µm Al şerit	240	366mm

2.3.5. Kapsülleme Malzemesi

“2.2.5. Kapsülleme Malzemesinin Uygulanması” başlığında kapsülleme malzemelerinin seçiminde önemli olan kriterler detaylı olarak verilmiştir. Bu bilgiler değerlendirildiğinde kapsülleme malzemesi için kullanılabilir üç seçim kriteri bulunmaktadır. Bunlar kapsülleme malzemesinin dielektrik dayanımı (İng, dielectric strength), termal iletkenliği ve azami çalışma sıcaklığıdır. İncelenen kapsülleme malzemeleri ve özellikleri Çizelge 2.3.8’de verilmiştir. Çizelgedeki dielektrik dayanım değeri ilgili kapsülleme malzemesinin milimetre başına asgari kaç kilovolt değerine (kV/mm) kadar dayanabildiğini belirtmektedir. Termal iletkenlik değeri kapsülleme malzemesi ısı transfer katsayısının $W/m \times K$ (Watt/metre \times Kelvin) cinsinden gösterimidir [95]. Azami çalışma sıcaklığı da kapsülleme malzemesinin bozulmadan çalışabileceği üst sıcaklık değerini göstermektedir.

Çizelge 2.3.6 Kapsülleme malzemeleri ve özellikleri

Üretici ve Parça Numarası	Dielektrik Dayanımı	Termal İletkenlik	Çalışma Sıcaklığı
RayTech Magic Power Gel [96]	>20kV/mm	-	-60°C +200°C
CHT EGEL 3000 [97]	>18.5kV/mm	0.18 W/m×K	-55°C +200°C
DOW Sylgard 527 Si Gel [98]	>17kV/mm	-	-45°C +150°C
HellermannTyton Relicon Religel Plus 500 [99]	>25kV/mm	0.15 W/m×K	-60°C +200°C

Çizelge 2.3.8 incelendiğinde en yüksek dielektrik dayanıma “Relicon Religel Plus 500” ürünü sahipken, “EGEL 3000” kapsülleme malzemesinin diğerlerine göre daha yüksek termal iletkenliği bulunmaktadır. Anahtarlama elemanlarının çalışması sırasında yonganın üst yüzeyi veya tel üzerinde oluşan ısının aktarılması için termal iletkenliğin yüksek olması önemlidir. Bu nedenle yüksek termal iletkenlik, yüksek dielektrik dayanımı ve +200°C azami çalışma sıcaklığına sahip olduğu için “EGEL 3000” ürünü tercih edilmiştir.

2.3.6. Analizler

2.3.6.1. Güç Kayıp Hesabı

Bu başlıkta alt modülün anahtarlama kayıpları hesaplanmıştır [100–102]. İki farklı güç değeri için kayıp analizleri yapılmıştır. İlk hesaplama 12.9kW (FAZ-1), ikinci hesaplama ise 25.8kW (FAZ-2) toplam güç değeri içindir. İki farklı güç için kullanılan tasarım parametreleri Çizelge 2.3.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.3.7. Tasarım parametreleri

FAZ-1		FAZ-2	
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Toplam Güç, P	12.9 kW	Toplam Güç, P	25.8 kW
DC-Link Gerilim, V	800 V	DC-Link Gerilim, V	800 V
Güç Faktörü, PF, $\cos\theta$	0.98	Güç Faktörü, PF, $\cos\theta$	0.98
Faz Gerilim, $V_{LL(rms)}$	380 V _{RMS}	Faz Gerilim, $V_{LL(rms)}$	380 V _{RMS}
Faz Akım, $I_{L(rms)}$	20 A _{RMS}	Faz Akım, $I_{L(rms)}$	40 A _{RMS}
Anahtarlama Frekansı, f_{sw}	50 kHz	Anahtarlama Frekansı, f_{sw}	50 kHz

İlk olarak FAZ-1 ve FAZ-2 tasarımları için ortak kullanılan değerler paylaşılmıştır. Kullanılan SiC MOSFET [75] ve SiC diyot [77] yongalarının veri sayfalarında sırasıyla “75mΩ, 30A, 1200V” ve “1.5V_F, 20A, 1200V” bilgileri bulunmaktadır. C3M0075120J numaralı SiC MOSFET ayırık anahtarın veri sayfasında [103] ise V_{ds} gerilimi 800V ve I_D akımı 20A değerindeyken “E_{on} = 0.200mJ” ve “E_{off} = 0.090mJ” olarak verilmiştir. Aynı gerilim ve akım koşulundaki E_{on} ve E_{off} değerlerinin toplamından da “E_{sw} = 0.290mJ” hesaplanmıştır. Modülasyon indeksi değerinin hesaplanması da aşağıda verilmiştir.

- Modülasyon İndeksi: $M_I = \frac{V_{LL(rms)}}{V_{DC-Link}/\sqrt{2}} = \frac{380V}{800/\sqrt{2}} = 0.67$ (1)

FAZ-1 için gerçekleştirilen hesaplamalar aşağıda sırasıyla gösterilmiştir.

- $I_{L(rms)} = \frac{P}{\sqrt{3} \times \cos\theta} = \frac{12.9kW}{\sqrt{3} \times 380V \times 0.98} = 20.0A$ (2)

- $I_{tepe} = I_{L(rms)} \times \sqrt{2} = 28.3A$ (3)

- Paralel bağlanması gereken yonga sayısı:

$$N_{MOSFET} = \frac{I_{tepe} \times 1.2}{I_{yng}} = \frac{28.3 \times 1.2}{30} = 1.13 \approx 1$$
 (4)

- Pozitif bölgedeki rms akımı:

$$I_{rms_P} = \sqrt{2} \times I_{L(rms)} \times \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{MI \times \cos\theta}{3\pi}} =$$

$$= \sqrt{2} \times 20.0 \times \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{0.67 \times 0.98}{3\pi}} = 12.50A$$
 (5)

- Negatif bölgedeki rms akımı:

$$I_{rms_N} = \sqrt{2} \times I_{L(rms)} \times \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{MI \times \cos\theta}{3\pi}} =$$

$$= \sqrt{2} \times 20.0 \times \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{0.67 \times 0.98}{3\pi}} = 6.67A$$
 (6)

- İletim güç kaybı:

$$P_{cond} = [I_{rms_P}^2 + I_{rms_N}^2] \times R_{DS(ON)} =$$

$$= [12.20^2 + 6.67^2] \times \left(\frac{75m}{1}\right) = 14.50W$$
 (7)

- Ortalama yonga akımı:

$$I_{ort_yng} = \frac{I_{tepe}}{\pi} / N_{MOSFET} = \frac{28.3}{\pi} / 1 = 9.02 A$$
 (8)

- Yonganın anahtarlama enerji kaybı:

$$E_{sw_yng} = \frac{I_{ort_yng} \times V_{DC-Link}}{I_{test} \times V_{test}} \times E_{sw_test} =$$

$$= \frac{9.02A \times 800V}{20A \times 800V} \times 0.290mJ = 0.131 mJ$$
 (9)

- Anahtarlama güç kaybı:

$$P_{sw} = E_{sw_yng} \times f_{sw} \times N_{MOSFET} =$$

$$= 0.131mJ \times 50kHz \times 1 = 6.55 W$$
 (10)

- Toplam güç kaybı:

$$P_t = P_{cond} + P_{sw} = 14.50 + 6.55 = 21.05 W$$
 (11)

FAZ-2 için gerçekleştirilen hesaplamalar aşağıda sırasıyla gösterilmiştir.

- $I_{L(rms)} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_{LL(rms)} \times \cos\theta} = \frac{26.3W}{\sqrt{3} \times 380V \times 0.98} = 40.0A$ (12)

- $I_{tepe} = I_{L(rms)} \times \sqrt{2} = 56.6 A$ (13)

- Paralel bağlanması gereken yonga sayısı:

$$N_{MOSFET} = \frac{I_{tepe} \times 1.2}{I_{yng}} = \frac{56.6 \times 1.2}{30} = 2.27 \approx 2$$
 (14)

- Pozitif bölgedeki rms akımı:

$$\begin{aligned} I_{rms_P} &= \sqrt{2} \times I_{L(rms)} \times \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{M\dot{i} \times \cos\theta}{3\pi}} = \\ &= \sqrt{2} \times 40.0 \times \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{0.67 \times 0.98}{3\pi}} = 24.98A \end{aligned}$$
 (15)

- Negatif bölgedeki rms akımı:

$$\begin{aligned} I_{rms_N} &= \sqrt{2} \times I_{L(rms)} \times \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{M\dot{i} \times \cos\theta}{3\pi}} = \\ &= \sqrt{2} \times 40.0 \times \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{0.67 \times 0.98}{3\pi}} = 13.31A \end{aligned}$$
 (16)

- İletim güç kaybı:

$$\begin{aligned} P_{cond} &= [I_{rms_P}^2 + I_{rms_N}^2] \times R_{DS(ON)} = \\ &= [24.98^2 + 13.31^2] \times \left(\frac{75m}{2}\right) = 30.04W \end{aligned}$$
 (17)

- Ortalama yonga akımı:

$$I_{ort_yng} = \frac{I_{tepe}}{\pi} / N_{MOSFET} = \frac{56.6}{\pi} / 2 = 9.01 A$$
 (18)

- Yonganın anahtarlama enerji kaybı:

$$\begin{aligned} E_{sw_yng} &= \frac{I_{ort_yng} \times V_{DC-Link}}{I_{test} \times V_{test}} \times E_{sw_test} = \\ &= \frac{9.01A \times 800V}{20A \times 800V} \times 0.290mJ = 0.131 mJ \end{aligned}$$
 (19)

- Anahtarlama güç kaybı:

$$\begin{aligned} P_{sw} &= E_{sw_yng} \times f_{sw} \times N_{MOSFET} = \\ &= 0.131mJ \times 50kHz \times 2 = 13.10 W \end{aligned}$$
 (20)

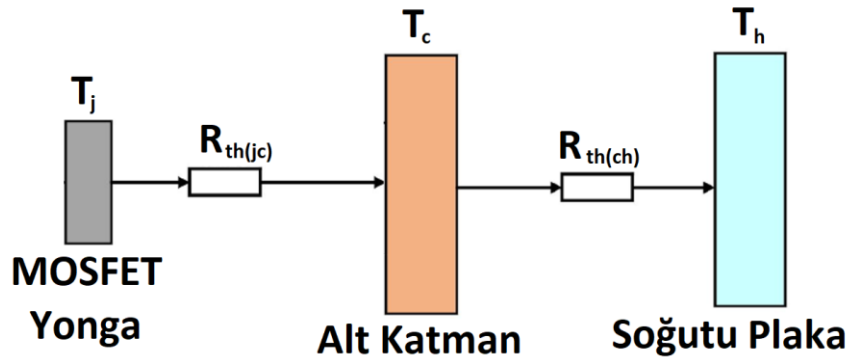
- Toplam güç kaybı:

$$P_t = P_{cond} + P_{sw} = 30.04 + 13.10 = 43.14 W$$
 (21)

Sonuç olarak FAZ-1 için 21.05W, FAZ-2 için 43.14W toplam kayıp değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler termal analizde kullanılan olup sıcaklığın düşük çıkması durumunda da anahtarlama frekansı arttırılarak yapılan hesaplamalar tekrarlanabilir.

2.3.6.2. Termal Analiz

Bu kısımda “Güç Kayıp Hesabı” başlığında hesaplanan kayıp değerleri kullanılarak SiC MOSFET anahtarın çalışma sıcaklığı hesaplamalarına yer verilmiştir. Modül içerisindeki yongadan soğutucu plakaya ısı aktarımı gerçekleştirilerek yonganın soğutulması sağlanmaktadır. Fakat bu ısının aktarımı kullanılan alt katman malzemesine, anahtar ile alt katmanın arasındaki lehim malzemesine ve alt katman ile soğutucu plaka arasında kullanılan termal iletken macunlarının termal iletkenlik değerlerine bağlıdır. Modül ve soğutucu plakanın basit termal modeli Şekil 2.3.4’te gösterilmiştir. Bu şekildeki T_j yonganın jonksiyon (İng, junction) sıcaklığını, T_c alt modülün sıcaklığını, T_h soğutucu plakasının (İng, heat sink) sıcaklığına; $R_{th(jc)}$ yonga ile alt modül arasındaki ısı direnci (İng, thermal resistance) ve $R_{th(ch)}$ alt modül ile soğutucu plaka arasındaki ısı direncine karşılık gelmektedir.



Şekil 2.3.4 Modül ve soğutucu plaka basitleştirilmiş termal modelin alt bileşenleri ([102]’den esinlenilmiştir)

Yonga ile alt katman arasında yonga bağlama aşamasında kullanılan lehim pasta tabakası bulunmaktadır. Z. Wang vd. 100um’lik 0.8W/m×K termal iletkenliği olan termal macun kullanmıştır [100]. Saf gümüşün termal iletkenlik katsayısı 429 W/m×K [95], gümüş alaşımlı pastalar ise 50 W/m×K ile 100 W/m×K aralığında olup gümüş sinterlemeyle bu değer 250 W/m×K seviyelerine çıkabilmektedir [104–106]. Hesaplamalarda kullanılan Au₈₀Sn₂₀ lehim alaşımın (Lehim-1) termal iletkenlik değeri ise 57 W/m×K’dir [107].

Kullanılan DBC seramik alt katman “0.3mm Cu, 0.635mm %96 Al₂O₃, 0.3mm Cu” özelliğindedir. Termal iletkenlik değerleri “%96 Al₂O₃” için 25W/m×K [108], bakırın ise 401.0 W/m×K’dır [95]. Aynı zamanda AlN malzemenin de termal iletkenliği 170 W/m×K’dır [109]. Değerlere bakıldığında Al₂O₃ alt katmana göre AlN malzemenin termal iletkenliği 6-7 kat daha iyidir.

Alt katman ile soğutucu plaka arasındaki termal iletkenlik için Sn₆₃Pb₃₇ lehim pastası hesaplamalarda kullanılmıştır. Termal iletkenlik değeri 50.0 W/m×K’dır [110]. Modül katmanları ve termal eşdeğer devresi Şekil 2.3.5’te detaylı bir şekilde verilmiştir. En üst katmanda yonga, yonga ile alt katman arasında “Lehim-1”, alt katman ile soğutucu plaka arasında da “Lehim-2” kullanıldığı gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.3.4’te olduğu gibi Şekil 2.3.5’te de termal eşdeğer devresindeki sıcaklık noktaları ile ısıl dirençler gösterilip isimlendirilmiştir.



Şekil 2.3.5. Modül katmanları ve termal eşdeğer devresi

Sıcaklık değişimi hesaplama formülü aşağıda verilmiştir [111].

$$Q = k \times A \times \frac{\Delta T}{L} \rightarrow \Delta T = \frac{L \times Q}{k \times A} \quad (22)$$

- Q : Kayıp, W
- k : Termal İletkenlik, W/m×K
- A : Kesit Alanı, m²
- ΔT : Sıcaklık Değişimi, K
- L : Uzunluk, m

Öncelikle yonga, lehim-1, lehim-2, alt katman için ilgili parametreler verilmiştir.

$$\bullet L_{Lehim_1} = L_{Lehim_2} = 100\mu m = 100 \times 10^{-6} m \quad (23)$$

$$\bullet L_{DBC_Al2O3} = 0.635 mm = 635 \times 10^{-6} m \quad (24)$$

$$\bullet L_{DBC_Cu} = 0.300 mm = 300 \times 10^{-6} m \quad (25)$$

$$\bullet A_1 = A_{Yonga} = A_{Lehim_1} = 2.8mm \times 2.5mm = 7 \times 10^{-6} m^2 \quad (26)$$

$$\bullet A_2 = A_{DBC} = A_{Lehim_2} = 40mm \times 40mm = 1600 \times 10^{-6} m^2 \quad (27)$$

$$\bullet k_{DBC_Al2O3} = 25 \frac{W}{m \times K} \quad (28)$$

$$\bullet k_{DBC_Cu} = 401 \frac{W}{m \times K} \quad (29)$$

$$\bullet k_{Lehim_1} = 57 \frac{W}{m \times K} \quad (30)$$

$$\bullet k_{Lehim_2} = 50.0 \frac{W}{m \times K} \quad (31)$$

Bu kısımda sırasıyla sıcaklık değişimleri $Q=21.1W$ için hesaplanmıştır.

$$\bullet T_{Lehim_1} - T_{Yonga} = \Delta T_1 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(100 \times 10^{-6})(21.1)}{(57)(7 \times 10^{-6})} = 5.29^\circ C \quad (32)$$

$$\bullet T_{DBC_Cu1} - T_{Lehim_1} = \Delta T_2 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(300 \times 10^{-6})(21.1)}{(401)(7 \times 10^{-6})} = 2.26^\circ C \quad (33)$$

$$\bullet T_{DBC_Al2O3} - T_{DBC_Cu1} = \Delta T_3 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(635 \times 10^{-6})(21.1)}{(25)(1600 \times 10^{-6})} = 0.34^\circ C \quad (34)$$

$$\bullet T_{DBC_Cu2} - T_{DBC_Al2O3} = \Delta T_4 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(300 \times 10^{-6})(21.1)}{(401)(1600 \times 10^{-6})} = 0.01^\circ C \quad (35)$$

$$\bullet T_{Lehim_2} - T_{DBC_Cu2} = \Delta T_5 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(100 \times 10^{-6})(21.1)}{(50.0)(1600 \times 10^{-6})} = 0.03^\circ C \quad (36)$$

$$\rightarrow \Delta T_{Toplam} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 + \Delta T_5 = 7.91^\circ C \quad (37)$$

Hesaplanan değer FAZ-1 aşaması için yapılmıştır. Aynı hesaplama FAZ-2 için gerçekleştirilecek olursa ($Q = 43.14W$ ve Yonga Sayısı=2);

$$\bullet T_{Lehim_1} - T_{Yonga} = \Delta T_1 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(100 \times 10^{-6})(43.14)}{(57)(2 \times 7 \times 10^{-6})} = 5.41^\circ C \quad (38)$$

$$\bullet T_{DBC_Cu1} - T_{Lehim_1} = \Delta T_2 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(300 \times 10^{-6})(43.14)}{(401)(2 \times 7 \times 10^{-6})} = 2.31^\circ C \quad (39)$$

$$\bullet T_{DBC_Al2O3} - T_{DBC_Cu1} = \Delta T_3 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(635 \times 10^{-6})(43.14)}{(25)(1600 \times 10^{-6})} = 0.68^\circ C \quad (40)$$

$$\bullet T_{DBC_Cu2} - T_{DBC_Al2O3} = \Delta T_4 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(300 \times 10^{-6})(43.14)}{(401)(1600 \times 10^{-6})} = 0.02^\circ C \quad (41)$$

$$\bullet T_{Lehim_2} - T_{DBC_Cu2} = \Delta T_5 = \frac{L \times Q}{k \times A} = \frac{(100 \times 10^{-6})(43.14)}{(50.0)(1600 \times 10^{-6})} = 0.05^\circ C \quad (42)$$

$$\rightarrow \Delta T_{Toplam} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 + \Delta T_5 = 8.47^\circ C \quad (43)$$

Soğutucu plakanın hava soğutmalı ve 70°C olacağı varsayılırsa SiC MOSFET yonga sıcaklığı 78.47°C olarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki hesaplamalar Al₂O₃ alt katman için yapılmıştır. Al₂O₃ alt katman yerine AlN alt katman kullanıldığında FAZ-2 için hesaplanan ΔT_3 değeri 0.68°C'den 0.10°C'ye düşmektedir. Sıcaklık farkı yüzde olarak fazla olmasına rağmen 0.58°C'lik düşük bir fark bulunmaktadır. Bunun nedeni ise alt katmanın boyutunun 40x40mm olması ve sıcaklığın dağılabileceği kesit alanının fazla olmasıdır.

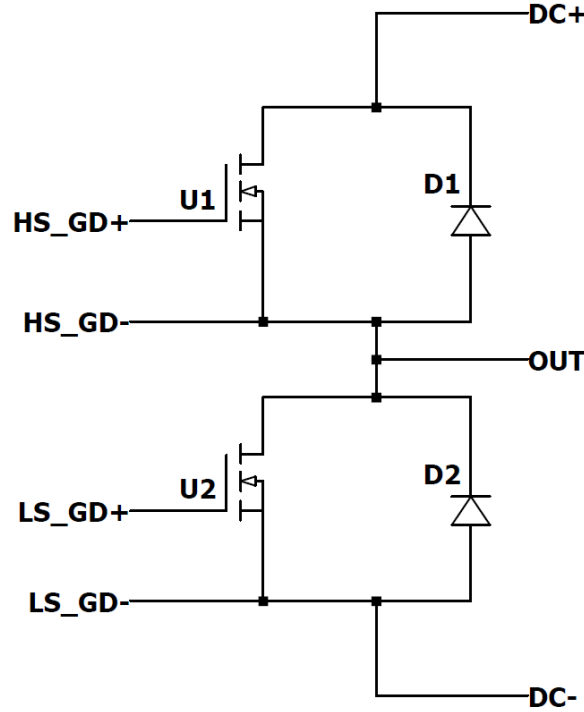
Bir diğer değişken olan “Lehim-1” malzemesinin de etkisine bakılacak olursa 57.3 W/m×K termal iletkenliği olan Au₈₀Sn₂₀ yerine 1 W/m×K termal iletkenliği olan lehim malzemesi ile hesaplar tekrarlanmıştır. “Lehim-1” malzemesi değiştirildiği zaman ΔT_1 sıcaklık değişimi 5.38°C'den 308.14°C'ye çıkmaktadır. Bunun nedeni ise kullanılan SiC MOSFET yonga boyutunun “2.8mm x 2.5mm” gibi çok küçük alandan bu ısıyı aktarmaya çalışmasıdır. Bu hesaplamadan da anlaşılacağı gibi yonga boyutu küçüldükçe ısı aktarılacak alan azalacağı için “Lehim-1” malzemesinin yüksek termal iletkenliğe sahip olmasının önemi artmaktadır. Benzer hesaplamayı termal iletkenliği 250 W/m×K olan gümüş sinterleme ile tekrarlayacak olursak ΔT_1 sıcaklık değişimi 5.38°C'den 1.23°C'ye düşmektedir. Yapılan hesaplama, gümüş sinterlemenin avantajını gözler önüne sermektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Üretim Çalışmaları

3.1.1. Alt Katman Tasarımı ve Üretimi

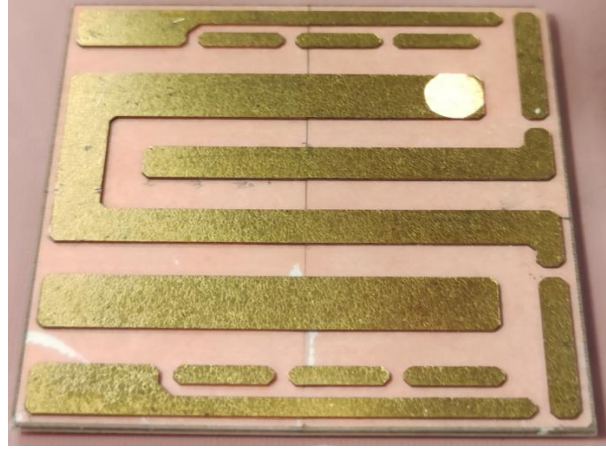
Tasarlanan alt modül, tek anahtar yerine piyasada da kullanılan ürünler gibi yarım köprü yapısındadır. Bu nedenle hem üst taraftaki (İng, high side) hem de alt taraftaki (İng, low side) anahtarlama elemanı bir alt modüle yerleştirilmiştir. Bu sayede yarım köprü türündeki alt modülün daha düşük parazitik endüktansı olması da hedeflenmiştir. Yarım köprü devre şeması Şekil 3.1.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1.1. Yarım köprü alt modül devre şeması

Temin edilen seramik alt katman “40mm x 40mm” boyutlarındadır. SiC MOSFET alt modülün yarım köprü yapısında olması ve ters-paralel diyotun kullanılmasının yanı sıra ısı dağılımının dengeli olması, kullanılan tel bağ uzunluklarının olabildiğince kısa olması, parazitik endüktansın düşük olması, akım yollarının kısaltılması gibi isterler de göz önüne alınarak devre yolları belirlenmiştir. Ayrıca ilk çalışmalarda gerilim atlama riski göz önüne alınarak gerilim seviyeleri 100V’tan fazla olan hatlar arasındaki mesafe 3mm olarak belirlenmiştir [112]. İlk doğrulamalar tamamlandıktan sonra hatlar arasındaki mesafe 1mm seviyelerine düşürülmüştür

Ardından alt katman işleme yöntemleri incelenmiştir. Ürünlerde genellikle aşındırma (İng, etch) yöntemi ile işleme yapıldığı birçok çalışmada görülmüştür [32, 113]. Fakat prototip çalışmalarda kart işleme yöntemi olarak herhangi bir kimyasal kullanılmadan, kolay uygulanabilir ve uygun maliyetli olması nedeniyle lazer işleme özelliği olan kart üretim cihazı kullanılmıştır. Lazer işleme sonrası elde edilen kart görseli Şekil 3.1.2’de verilmiştir.

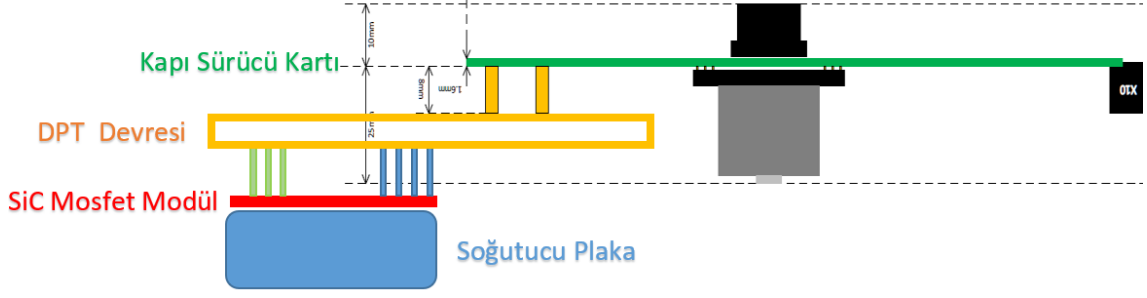


Şekil 3.1.2. Lazer işleme sonrası elektriksel yolların oluşturulduğu alt katman

3.1.2. Test Devresi Tasarımı, Analizi ve Üretimi

Hazırlanan alt modül ile elektriksel arayüz oluşturulması için test devre kartı tasarlanmıştır. Test devresi içerisinde DC güç beslemesi, pasif yük bağlantıları içermekle birlikte anahtarlama sırasında DC-Link geriliminin sabit olması için kart üzerinde kondansatör bankaları da bulunmaktadır. Çift darbe testinin gerçekleştirilebilmesi için yük olarak bobin kullanılmaktadır. Bobin bağlantısından dolayı oluşabilecek parazitik endüktansı en az seviyede tutabilmek için kart üzerine lehimeleme arayüzü bırakılmıştır. Benzer şekilde büyük değerlikli DC-link kondansatörünün de herhangi bir kablo kullanılmadan doğrudan test devre kartına bağlantısı yapılmıştır.

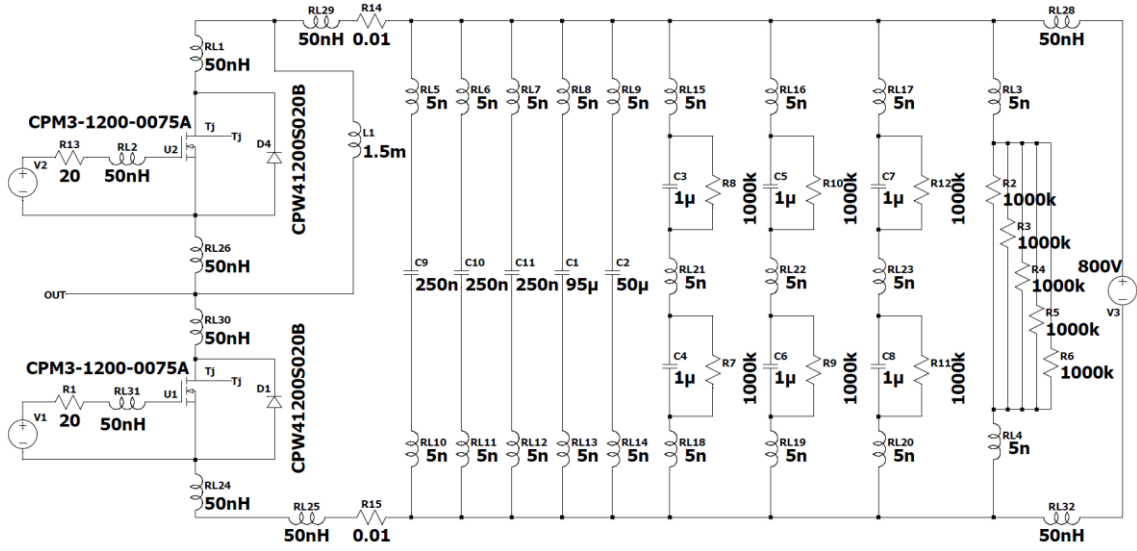
Test devresinin tasarımı yapılırken hem kapı sürücüyü hem de alt modüle sağlanacak bağlantı dikkate alınmıştır. Tasarım aşamasında dikkate alınan test düzeneği yerleşim çizimi Şekil 3.1.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1.3. Test düzeneği yerleşimi

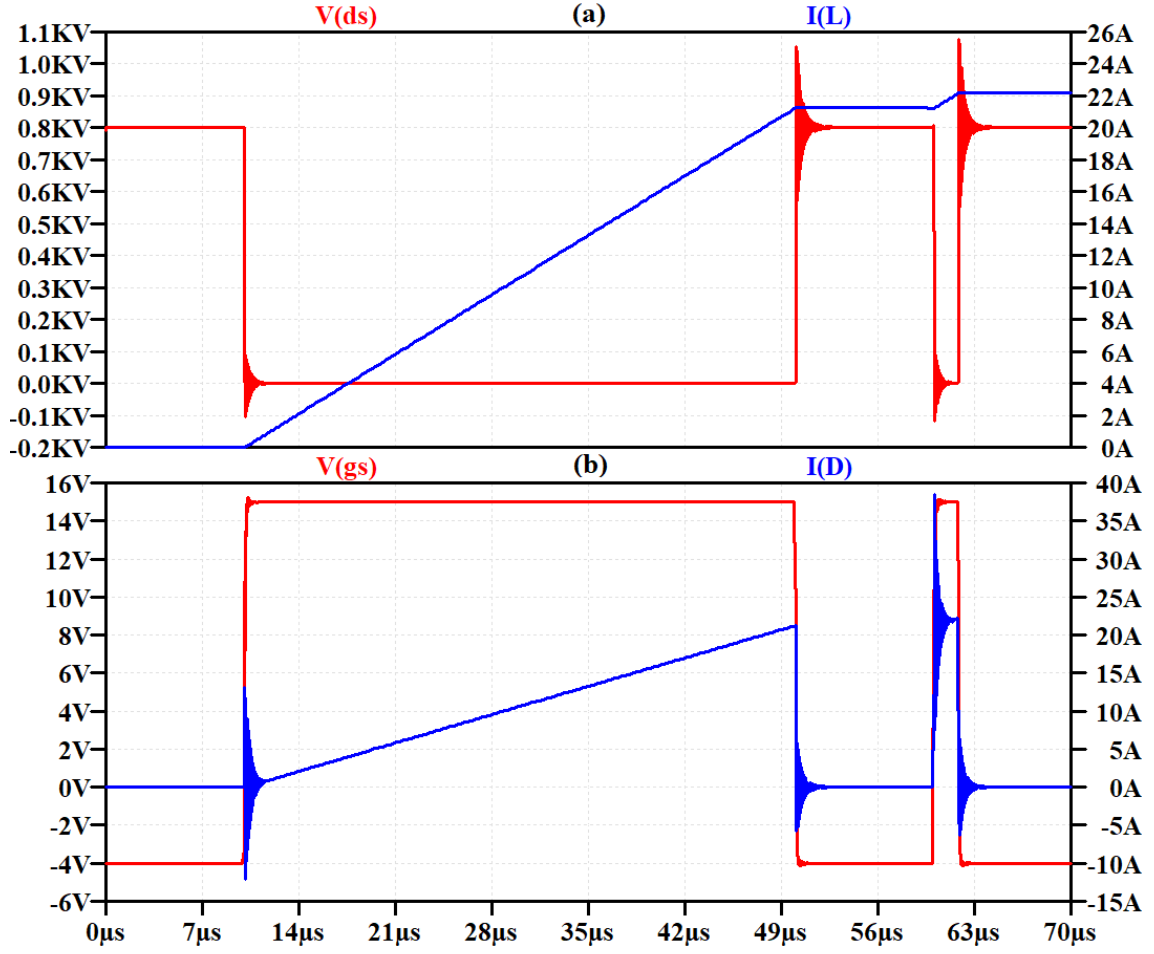
Test devresinin elektriksel analizinin gerçekleştirilmesi için LTspice ortamında devre kurulmuştur. LTspice ortamında hazırlanan devre şeması Şekil 3.1.4’te verilmiştir. Alt modül içerisinde kullanılan SiC MOSFET ve SiC Schottky diyotun Spice modeli Wolfspeed firmasının çevrimiçi ortamından temin edilip model içerisine eklenmiştir [114]. Alt modülün anahtarlanması sırasında DC-link geriliminin sabit kalması ve anlık akım ihtiyacının sağlanabilmesi için kondansatör bankası oluşturulmuştur.

1200V modül paket yapısındaki ticari SiC MOSFET anahtarlar incelenmiş olup anahtarların parazitik endüktans değerleri 4.9nH-21nH aralığında değişmektedir [115–122]. Yapılan ilk analizde kötü koşulun hesaplanması için paketleme, test devresi (örneğin yaylı pinler) ve güç kablolarından kaynaklanan parazitik endüktanslar [123, 124] model içerisine 50nH değerliğinde eklenmiştir. Ayrıca baskı devre kartı yollarından dolayı ortaya çıkan parazitik endüktans değeri 5nH olarak seçilip kondansatörlerin paraleline de yüksek değerlikli dirençler ($1M\Omega$) deşarj (İng, discharge) amacıyla eklenmiştir. Referans anahtarın veri sayfası [103] incelenip kapı sürücü direnci 20Ω belirlenmiştir. Çift darbe test devresinde kullanılması için 1.5mH değerinde bobin kullanılmıştır.



Şekil 3.1.4. LTSpice test devre şeması

Test akım seviyesi 20A olduğu için uygulanan ilk kare dalgada bobin 20A'ye şarj edilir. Ardından ikinci kare dalga uygulanıp ölçülmesi hedeflenen değerler elde edilmiştir. Şekil 3.1.5'te verilen ilk grafikte (a) test edilen anahtarın üzerindeki V_{ds} gerilimi ve bobin üzerinden geçen I_L akımı, ikinci grafikte (b) ise test edilen anahtara uygulanan V_{gs} kapı gerilimi ve alt modül test edilen anahtar üzerinden geçen I_D akımı verilmiştir.

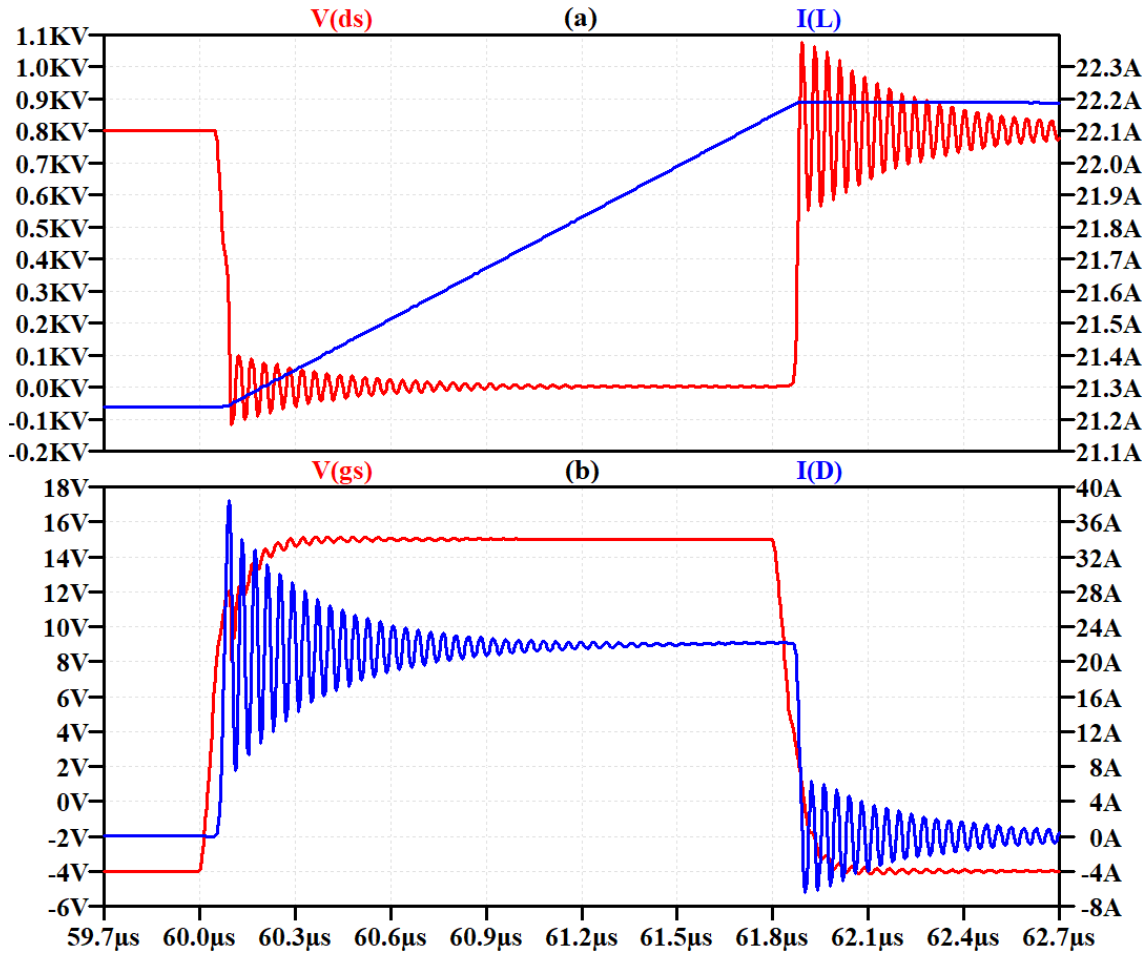


Şekil 3.1.5. Simülasyon ortamında çift darbe test sonucu. (a) Test edilen anahtarın V_{ds} gerilimi ve I_L bobin akımı. (b) Test edilen anahtarın V_{gs} gerilimi ve I_D akımı.

Şekil 3.1.5'te gösterildiği gibi bobin akımı (I_L) birinci kare dalgada 21A seviyesine ulaşmıştır. Ardından anahtarlama kaybı ve anahtarlama sürelerinin hesaplanması için daha kısa süreli olan ikinci kare dalga uygulanmıştır. Devre ve alt modüldeki parazitik endüktans nedeniyle anahtarın iletme girme ve iletimden çıkma anlarında akım (I_D) ve gerilim (V_{ds}) ölçümlerinde salınım oluşmaktadır.

Model içerisindeki parazitik endüktanslar 50nH iken alt modülün DC terminalleri arasındaki toplam parazitik endüktans 200nH olmaktadır. Bu parazitik endüktans değeriyle elde edilen yakından görüntü Şekil 3.1.6'da verilmiştir. Belirtilen şekil incelendiğinde anahtarlama anında V_{ds} gerilimi ve I_D akımı üzerinde dalgalanma olduğu görülmektedir. Şekil 3.1.6(a) grafiğinde test edilen anahtarın üzerindeki V_{ds} gerilimi, iletme girme anında $209V_{tt}$ değerinde gerilim salınımı; iletimden çıkma anında $528V_{tt}$ değerinde gerilim salınımı oluşmaktadır. Şekil 3.1.6(b) grafiğinde test edilen anahtarın üzerindeki I_D akımı, iletme girme anında $26.7A_{tt}$ değerinde akım salınımı; iletimden

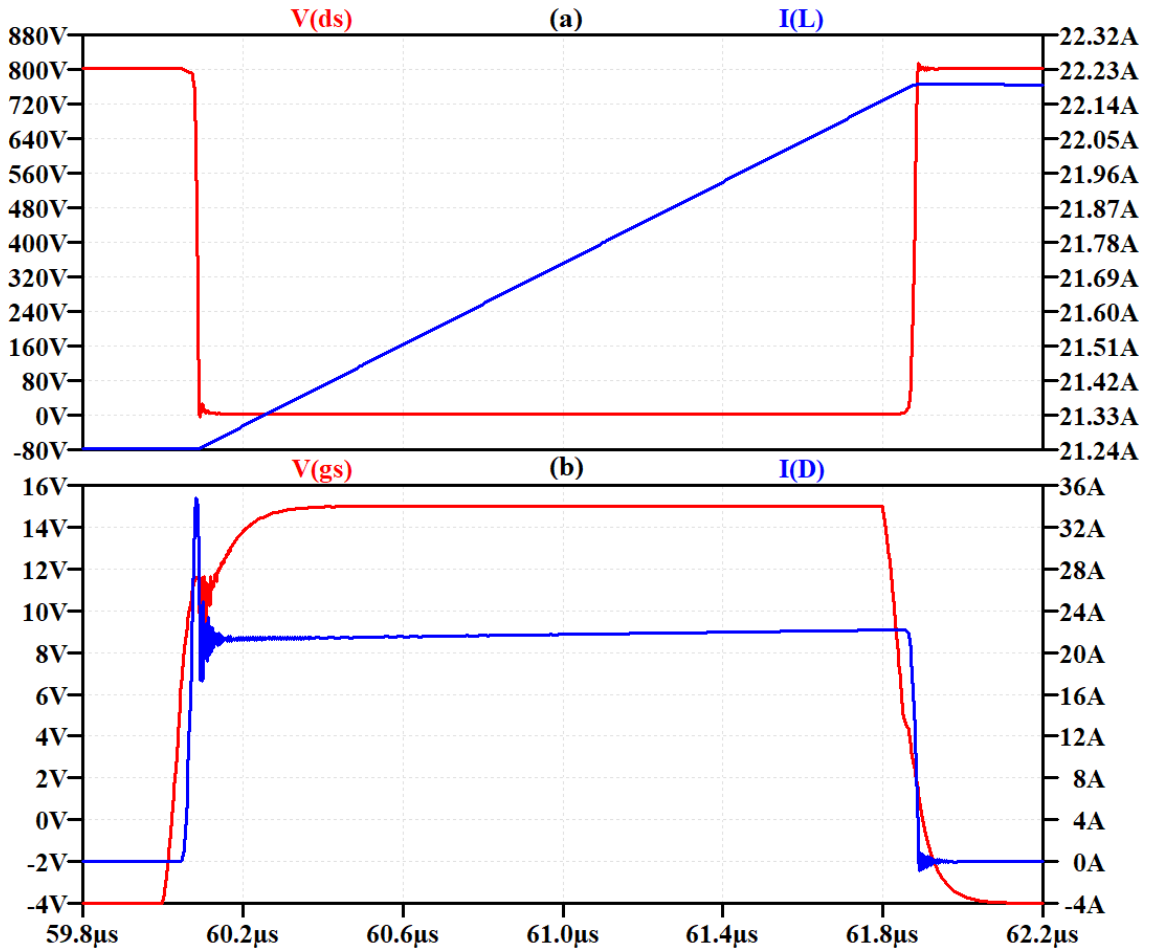
çıkma anında $12.8A_{tt}$ değerinde akım salınımı oluşmaktadır. Ayrıca anahtarlama anındaki I_D tepe akımı $38.6A$, V_{ds} tepe gerilim ise $1080V$ değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.1.6. Alt modülün parazitik endüktansı $200nH$ için simülasyon sonucu. (a) Test edilen anahtarın V_{ds} gerilimi ve I_L bobin akımı. (b) Test edilen anahtarın V_{gs} gerilimi ve I_D akımı.

Model içerisindeki parazitik endüktanslar $10nH$ iken alt modülün DC terminalleri arasındaki toplam parazitik endüktans $40nH$ olmaktadır. Bu parazitik endüktans değeriyle simülasyon tekrarlanmıştır. İletime girme anında V_{ds} gerilim salınımı $76V_{tt}$ ve I_D akım salınımı $16.0A_{tt}$; iletimden çıkma anında V_{ds} gerilim salınımı $159V_{tt}$ ve I_D akım salınımı $8.0A_{tt}$ değerindedir. Anahtarlama anındaki tepe akımı $35.7A$, tepe gerilim ise $887V$ değerine ulaşmıştır. Model içerisindeki parazitik endüktanslar $5nH$ iken alt modülün DC terminalleri arasındaki toplam parazitik endüktans $20nH$ ile simülasyon tekrarlanmıştır. İletime girme anında V_{ds} gerilim salınımı $71V_{tt}$ ve I_D akım salınımı $10.0A_{tt}$; iletimden çıkma anında V_{ds} gerilim salınımı $89V_{tt}$ ve I_D akım salınımı $5.9A_{tt}$ değerindedir. Anahtarlama anındaki tepe akımı $35.2A$, tepe gerilim ise $851V$ değerine ulaşmıştır.

Son olarak model içerisindeki parazitik endüktanslar 1nH iken alt modülün DC terminalleri arasındaki toplam parazitik endüktans 4nH olmaktadır. Bu parazitik endüktans değeriyle elde edilen görüntü Şekil 3.1.7’de verilmiştir. Belirtilen şekil incelendiğinde anahtarlama anında V_{ds} gerilimi ve I_D akımı üzerindeki dalgalanma, parazitik endüktansın 200nH olduğu sonuçlara göre ciddi düşüşler görülmektedir. Şekil 3.1.7(a) grafiğinde test edilen anahtarın üzerindeki V_{ds} gerilimi, ilettime girme anında $21V_{tt}$ değerinde gerilim salınımı; iletimden çıkma anında $18V_{tt}$ değerinde gerilim salınımı oluşmaktadır. Şekil 3.1.7(b) grafiğinde test edilen anahtarın üzerindeki I_D akımı, ilettime girme anında $6.4A_{tt}$ değerinde akım salınımı; iletimden çıkma anında $1.8A_{tt}$ değerinde akım salınımı oluşmaktadır. Ayrıca anahtarlama anındaki I_D tepe akımı 34.8A, V_{ds} tepe gerilim ise 815V değerine düşmüştür.



Şekil 3.1.7. Alt modülün parazitik endüktansı 4nH için simülasyon sonucu. (a) Test edilen anahtarın V_{ds} gerilimi ve I_L bobin akımı. (b) Test edilen anahtarın V_{gs} gerilimi ve I_D akımı.

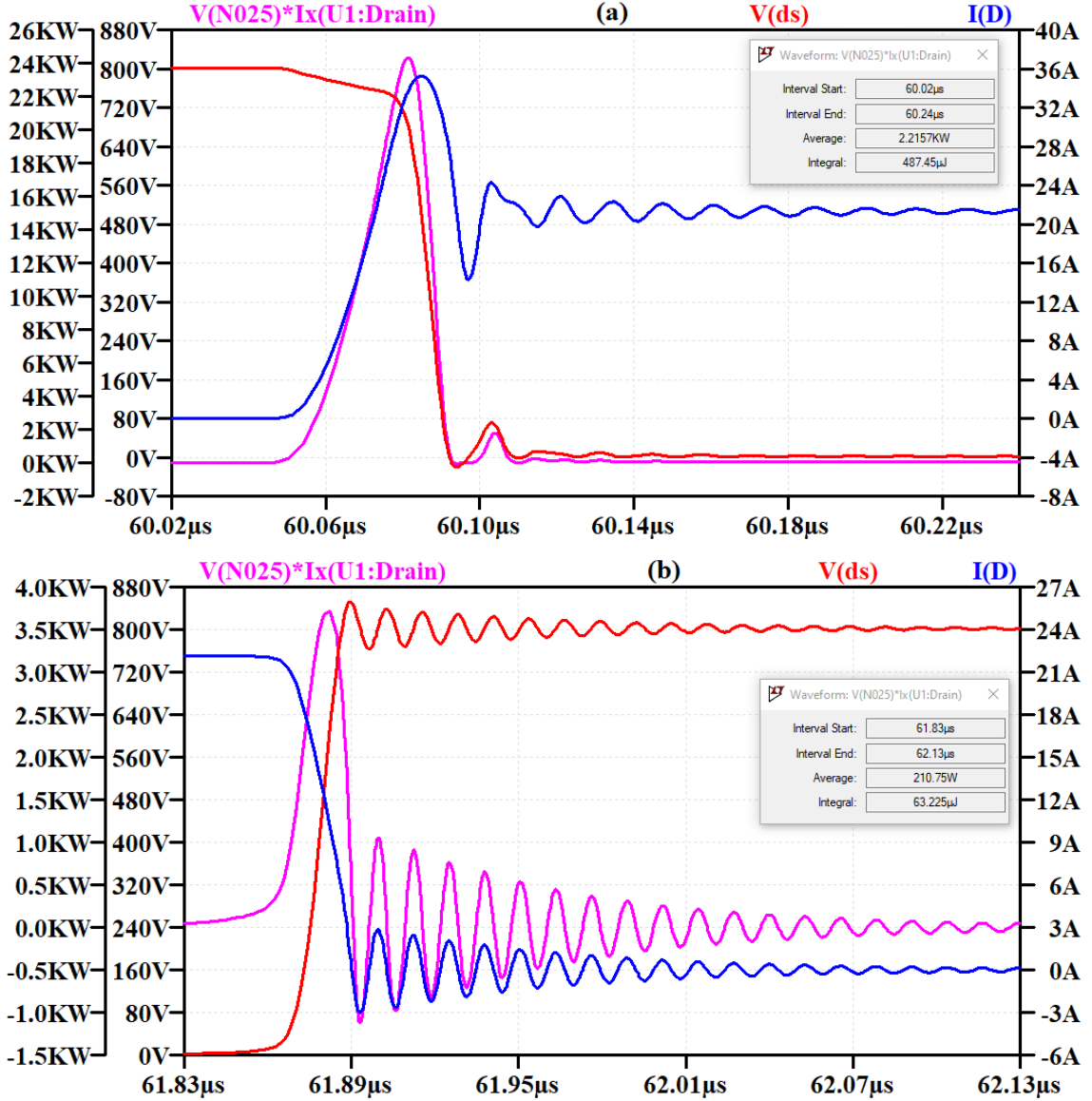
Yukarıdaki paragraflarda 4nH, 20nH, 40nH ve 200nH parazitik endüktans değerlerinde elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması için farklı parazitik endüktans değerlerinde ilettime giriş ve iletimden çıkış anındaki gerilim ve akım değerleri Çizelge 3.1.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.1. Farklı parazitik endüktans değerlerindeki akım ve gerilim salınımlarının karşılaştırması

Toplam Parazitik Endüktans (nH)	İletime Giriş			İletimden Çıkış		
	V _{ds} Salınım (V _{tt})	I _D Salınım (A _{tt})	I _D Tepe Akım (A)	V _{ds} Salınım (V _{tt})	I _D Salınım (A _{tt})	V _{ds} Tepe Gerilim (V)
4	21	6.4	34.8	18	1.8	815
20	71	10.0	35.2	89	5.9	851
40	76	16.0	35.7	159	8.0	887
200	209	26.7	38.6	528	12.8	1080

Çizelge 3.1.1 incelendiğinde parazitik endüktans arttıkça V_{ds} ve I_D salınım beklendiği gibi artmaktadır. Artan salınım nedeniyle modül üzerindeki stres ile elektromanyetik girişim sonucu oluşan gürültü de artmaktadır. Bu da modülün performansını doğrudan etkilemektedir [9–11]. Modülün parazitik endüktans değeri paketlemeden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle paketleme sonucu oluşan parazitik endüktansın küçük olması tercih edilmektedir.

Farklı parazitik endüktans değerleri için ilettime girişi (İng, turn on) ve iletimden çıkışı (İng, turn off) kayıpları, hazırlanan LTspice modeli üzerinden hesaplanmıştır. Toplam parazitik endüktansın 4nH, 20nH, 40nH ve 200nH değerlerinde ilettime giriş kaybı (E_{on}) ve iletimden çıkış kaybı (E_{off}) simülasyon ortamında elde edilip Çizelge 3.1.2’de verilmiştir. Anahtarlama kaybı hesaplaması sırasında toplam parazitik kapasitansın 20nH olduğu simülasyondan elde edilen grafik Şekil 3.1.8’de verilmiştir. Şekil 3.1.8(a)’da test edilen anahtarın ilettime girme anındaki sırasıyla üzerindeki akım ile gerilimin çarpımıyla elde edilen güç (kW) pembe renkle, test edilen anahtarın gerilimi (V) kırmızı renkle ve akımı (A) mavi renkle gösterilmiştir. LTspice grafiği üzerinden güç verisinin integrali alınarak elde edilen güç kaybı (μJ) Şekil 3.1.8(a) içerisinde de gösterildiği gibi 487.5μJ olarak hesaplanmıştır. Aynı hesaplama test edilen anahtarın iletimden çıkış anında da gerçekleştirilmiş olup Şekil 3.1.8(b)’de verilmiştir. İletimden çıkış kaybınının 63.2μJ olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.1.8. Alt modülün parazitik endüktansı 20nH için anahtarlama kaybı simülasyon sonucu. (a) İletime giriş kaybı, E_{on} . (b) İletimden çıkış kaybı, E_{off} .

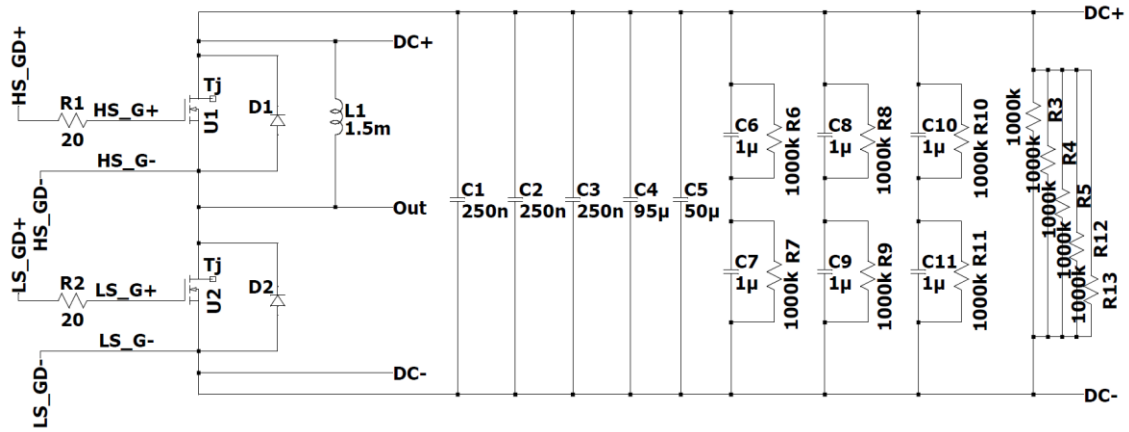
Çizelge 3.1.2. Farklı parazitik endüktans değerlerindeki anahtarlama kayıplarının karşılaştırması

Toplam Parazitik Endüktans (nH)	İletime Giriş Kaybı E_{on} (μJ)	İletimden Çıkış Kaybı E_{off} (μJ)	Toplam Kayıp $E_{on} + E_{off}$ (μJ)
4	495.5	61.9	557.4
20	487.5	63.2	550.7
40	475.9	68.9	544.8
200	302.5	93.0	395.5

Kayıp değerleri incelendiğinde parazitik endüktans değeri arttıkça iletimden çıkış kaybı artarken iletime girişi kaybının azaldığı görülmüştür. Öncelikle parazitik endüktans arttıkça iletime giriş kaybının azalmasının nedeni açıklanmıştır. Grafikler incelendiğinde

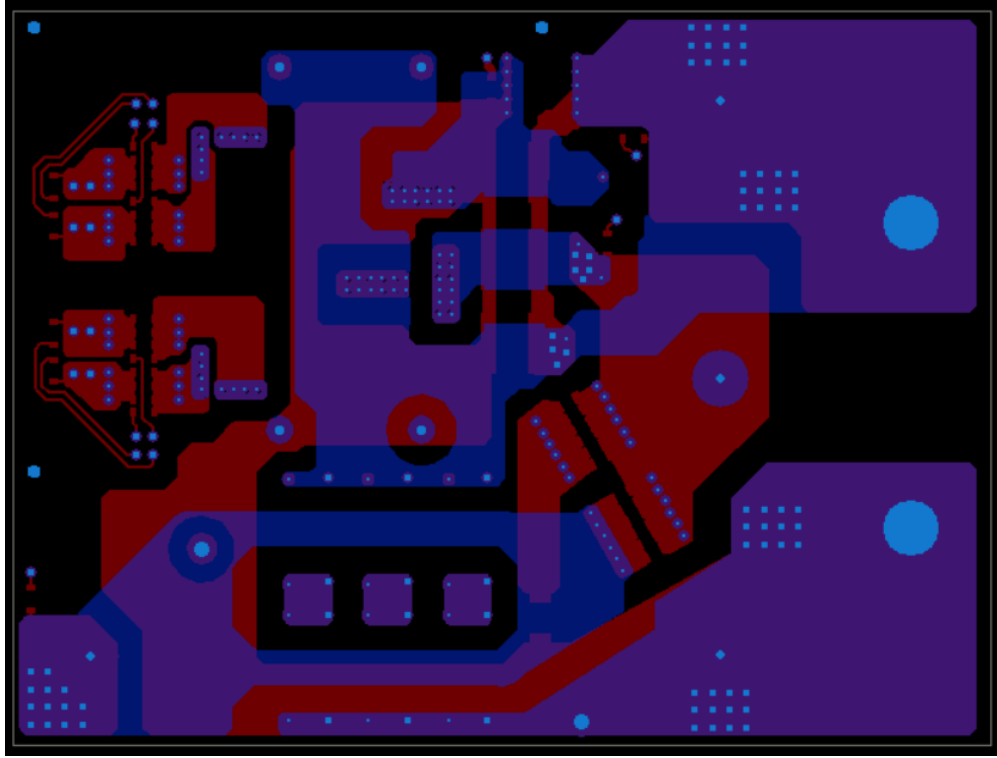
parazitik endüktans arttıkça akım değişimi sonrası anahtar üzerindeki gerilim düşümü artmaktadır. Bununla birlikte V_{ds} gerilimi daha hızlı düşmektedir. Kayıp değeri de akım ve gerilim çarpımıyla hesaplandığı için daha hızlı düşen gerilim nedeniyle iletme giriş kaybı da daha düşük çıkmaktadır. İletimden çıkış kaybı ise parazitik endüktans arttıkça akım ve gerilim değişiminin artmasıyla artmaktadır. Parazitik endüktans değeri 4nH yerine 200nH olduğu zaman anahtar üzerindeki gerilimin tepe değeri 815V'tan 1080V'lara çıkmaktadır. Bu nedenle iletimden çıkış anındaki kayıp parazitik endüktans ile birlikte artmaktadır. Fakat elde edilen sonuçlara göre toplam kayıp değerinin anahtarın parazitik endüktans değeriyle ters orantılı olduğu görülmüştür.

Simülasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra DPT test kartının hazırlanmasına geçilmiştir. Test kartının devre elemanları ve devre şeması Şekil 3.1.9'da verilmiştir.

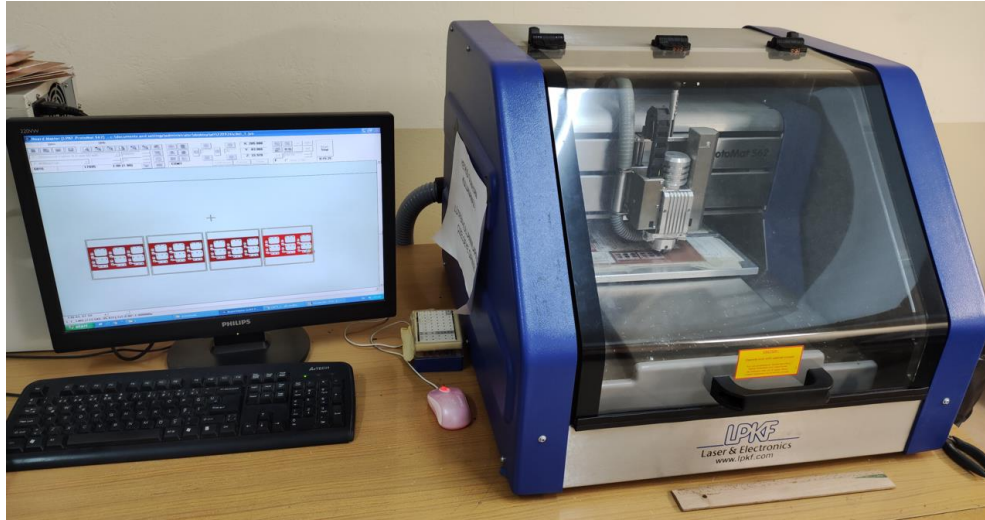


Şekil 3.1.9. DPT test kartının devre şeması

Şekil 3.1.9'da gösterilen DPT test devre şeması kullanılarak çift taraflı baskı devre kartı (BDK) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çift taraflı test devresi BDK çizimi Şekil 3.1.10'da verilmiştir. DPT test devresi Hacettepe Üniversitesi bünyesinde bulunan "Baskı Devre Laboratuvarında" üretilmiştir. Test kartının örnek üretim görseli Şekil 3.1.11'de verilmiştir.



Şekil 3.1.10. Çift taraflı BDK devre çizimi



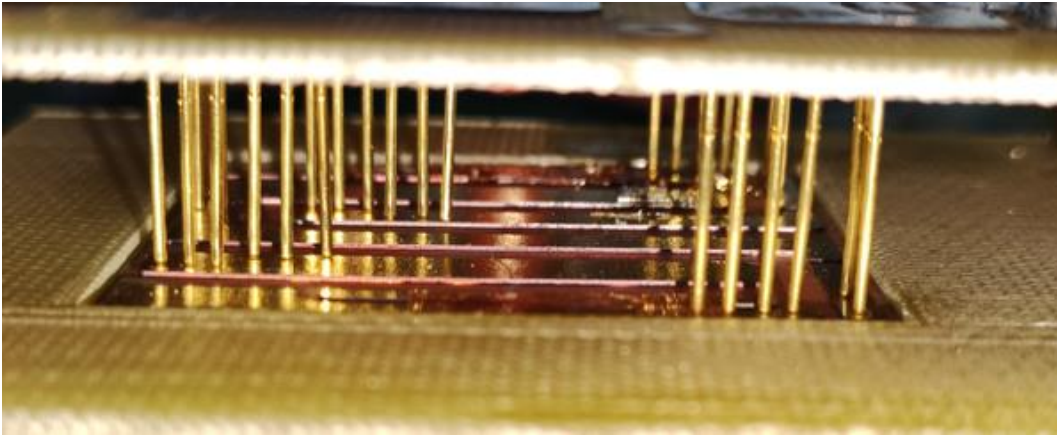
Şekil 3.1.11. Prototip test kartı üretimi

Şekil 3.1.12’de test devresinin bağlantıları tamamlandıktan sonraki görünümü verilmiştir. Bu test devresinde DPT test kartı olarak da belirtilen “arayüz devre kartı”, “alt modül” ve “karkas devre kartı” kısımlarından oluşmaktadır. Test devresi bağlantılarının gerçekleştirilmesi Şekil 3.1.13’te verilmiştir. Şekil 3.1.13(a)’da alt modül ile arayüz devre kartının yaylı pinler ile elektriksel bağlantısının sağlanması, Şekil 3.1.13(b)’de arayüz devre kartı ile karkas devre kartının mekanik bağlantısının yapılması, Şekil 3.1.13(c)’de ise alt modülün karkas devre kartına yerleştirilmesi gösterilmiştir. Alt modül ile arayüz

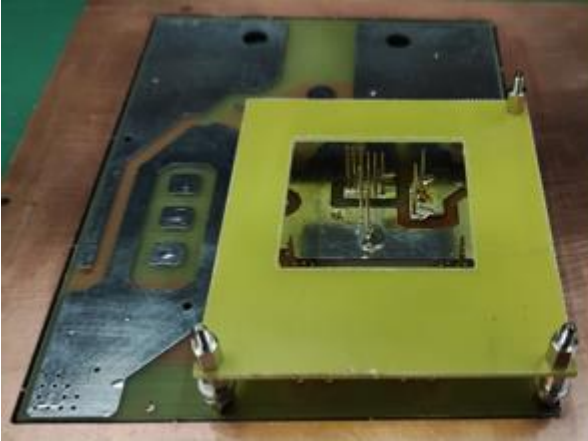
devre kartı arasındaki elektriksel bağlantılar için yaylı pinler kullanılmıştır. Yaylı pinlerin hareketli yapısı Şekil 3.1.14’te verilmiştir.



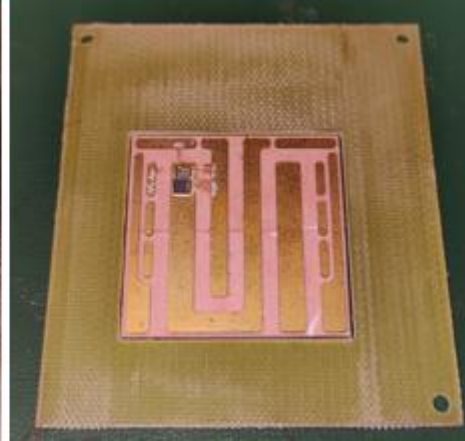
Şekil 3.1.12. Bağlantıları tamamlanan test devresinin yandan görünümü



(a)

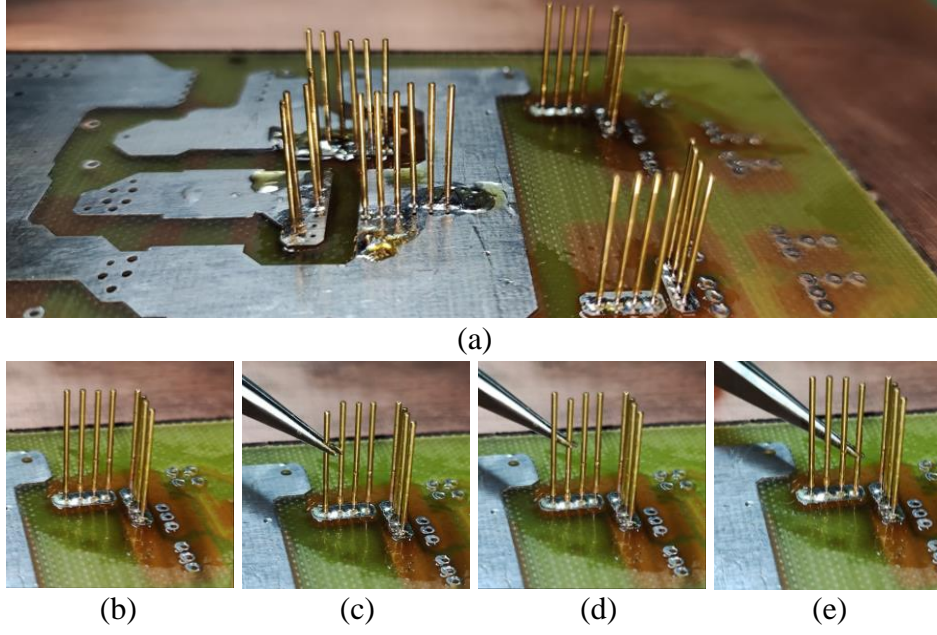


(b)



(c)

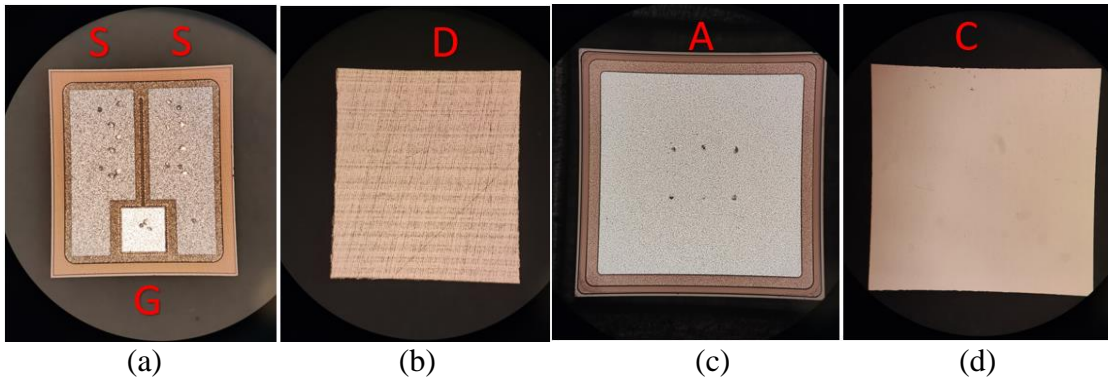
Şekil 3.1.13. Test devresi bağlantılarının gerçekleştirilmesi. (a) Alt modül ile arayüz devre kartının elektriksel bağlantısı. (b) Arayüz devre kartı ile karkas devre kartının mekanik bağlantısı. (c) Alt modülün karkas devre kartına yerleştirilmesi.



Şekil 3.1.14. Test devresinde kullanılan yaylı pinlerin hareketli yapısının gösterimi. (a)Yaylı pin uzaklaştırılmış gösterimi. (b)Hareketsiz konumda. (c-e)Hareketli konumda.

3.1.3. Alt Modül Üretimi

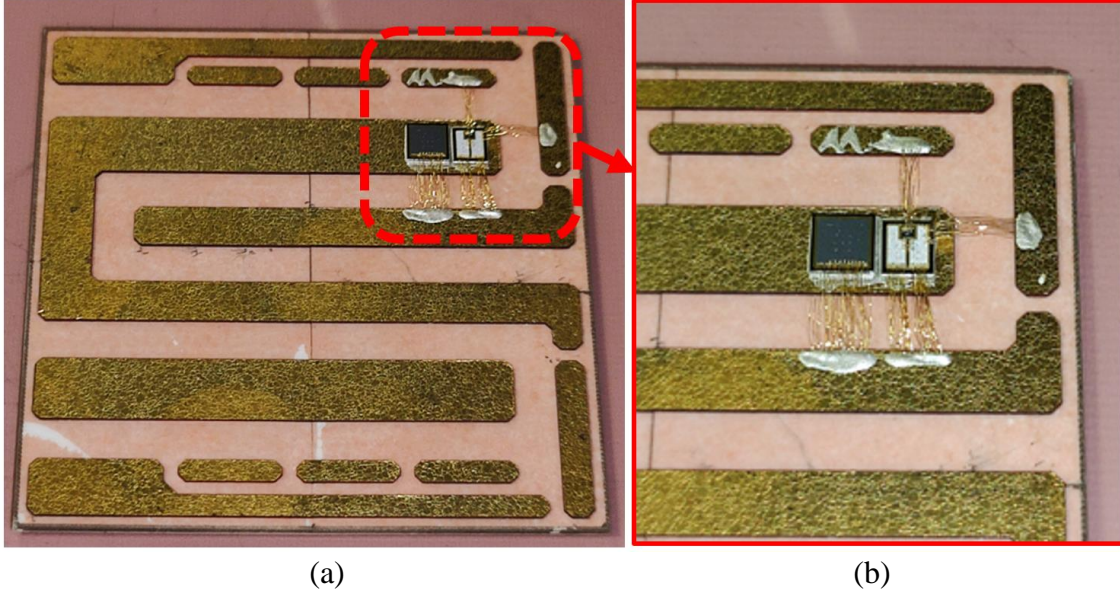
Kullanılan SiC MOSFET ve SiC diyot yongaların terminalleri optik mikroskop üzerinde incelenip üst ve alt yüzeyleri Şekil 3.1.15’te sırasıyla verilmiştir. Terminallerin Türkçe, İngilizce isimleri ve kısaltmaları “Kapı:Gate(G)”, “Akaç:Drain(D)”, “Kaynak:Source(S)”, “Anot:Anode(A)” ve “Katot:Cathode(C)” olarak verilmiştir.



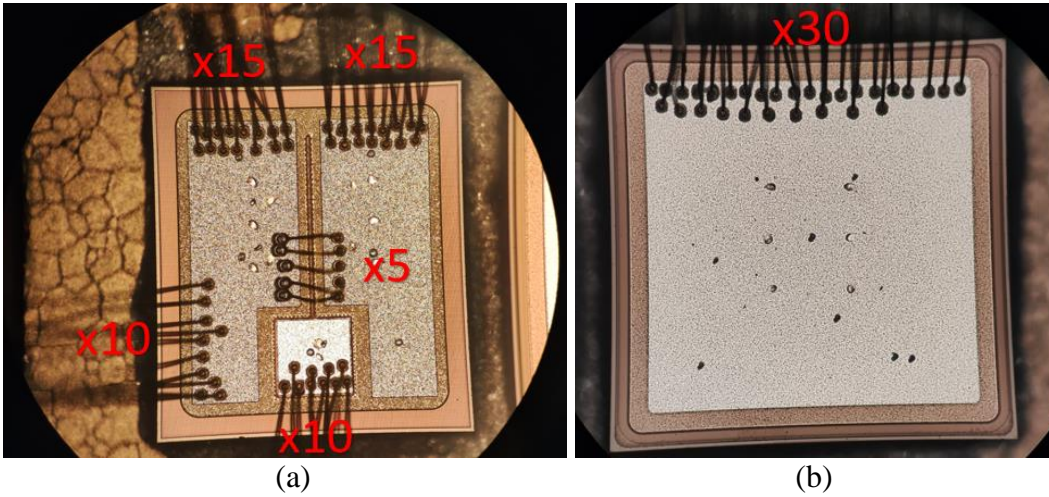
Şekil 3.1.15. SiC MOSFET ve SiC diyot yongaların görseli. (a) SiC MOSFET üst yüzeyi. (b) SiC MOSFET alt yüzeyi. (c) SiC diyot üst yüzeyi. (d) SiC diyot alt yüzeyi.

Şekil 3.1.15’te gösterilen yongaların alt katmana yerleştirdikten sonra yonga bağlama ve tel bağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. İşlemler sonrası elde edilen alt modülün görseli Şekil 3.1.16’da verilmiştir. Tel bağlama sonucu elde edilen alt modülün optik mikroskop üzerinde incelenip SiC MOSFET ve SiC diyot tel bağları ve adetleri sırasıyla Şekil

3.1.17(a) ve Şekil 3.1.17(b)'de gösterilmiştir. Çalışmalarda kullanılan makineler 1 mil altın tel ile kullanılabilirdiği ve kalın tel bağlama cihazı (İng, heavy wire bonder) bulunmadığı için 1 mil (25 µm) Au tel ile bağlamalar gerçekleştirilmiştir. Güç hatları için 30 adet tel, kapı sürme hattı için ise 10 adet tel paralel bağlanmıştır.



Şekil 3.1.16. Tel ve yonga bağlama sonrası alt modül görseli. (a)Uzaklaştırılmış görünüm. (b)Yakından görünüm.



Şekil 3.1.17. Tel bağlama sonrası yongaların optik mikroskop görüntüsü. (a) SiC MOSFET üzerindeki tel bağlar ve adetleri (b) SiC diyot üzerindeki tel bağlar ve adetleri

3.1.4. İzolasyon Malzemesinin Uygulanması

Kapsülleme malzemesi, “2.2.5. Kapsülleme Malzemesinin Uygulanması” başlığında detaylı olarak açıklandığı gibi anahtarların çalışma gerilimini yükseltmek için

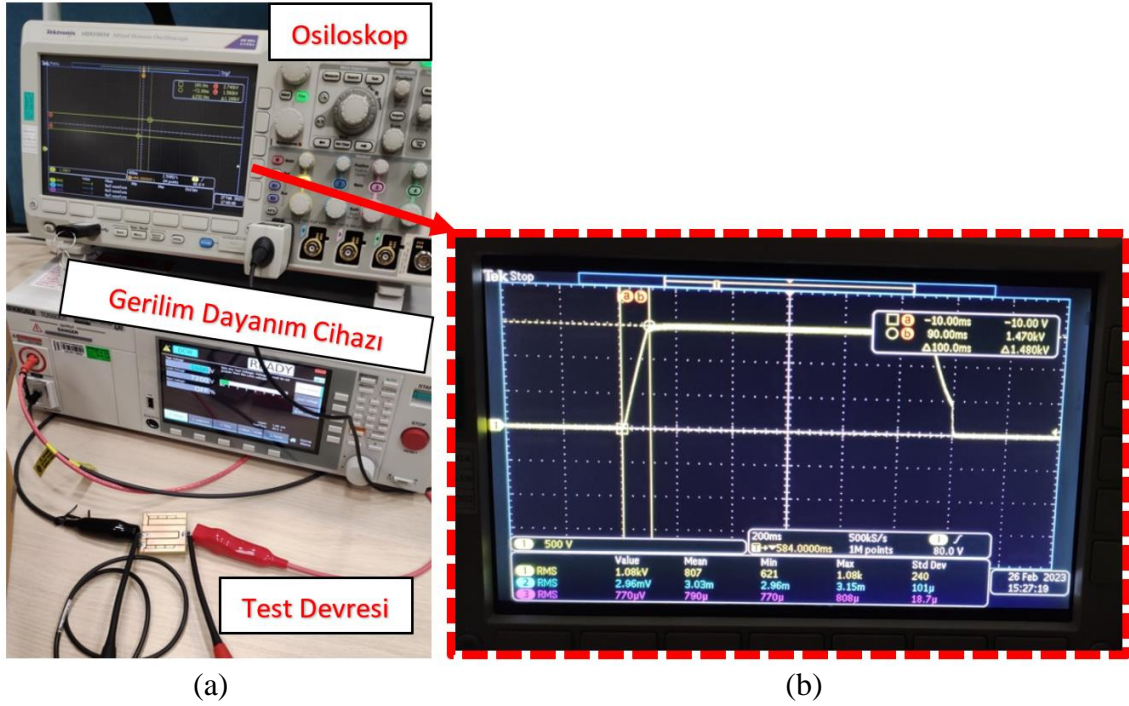
kullanılmaktadır. Farklı gerilimlere sahip iki iletken arasındaki asgari uzaklık ortama göre değişmektedir. Örneğin ortamda hava olduğu koşulda belirli bir gerilimde asgari mesafenin 10mm olması gerekirken izolasyon malzemesi ile bu seviyeler 1mm gibi değerlere düşürülebilir. Bu kısımda da ilk olarak iletken yüzeyler arasındaki mesafenin azami dayanma gerilimine etkisi incelenecektir.

Farklı izolasyon kalınlıklarında FR4 plaka üzerine prototip kart üretimi gerçekleştirilmiştir. Kartların izolasyon mesafesi 2mm, 1.5mm ve 1mm olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.1.18’de gösterilen kartlar soldan sağa doğru izolasyon mesafesi azalmaktadır.



Şekil 3.1.18. Farklı izolasyon mesafesindeki kartlar

Kartlar üretildikten sonra gerilim dayanım cihazı, yüksek gerilim ölçüm aleti ve osiloskop ile test devresi kurulmuştur. Osiloskop üzerinden uygulanan gerilim ölçülmüştür ve atlamanın olduğu gerilim incelenmiştir. Gerilim dayanım cihazının gerilim değişimi en düşük değeri olan 0.1 saniye olarak ayarlanmıştır. Gerilim dayanım test düzeneği ve örnek osiloskop görüntüsü Şekil 3.1.19’da verilmiştir.

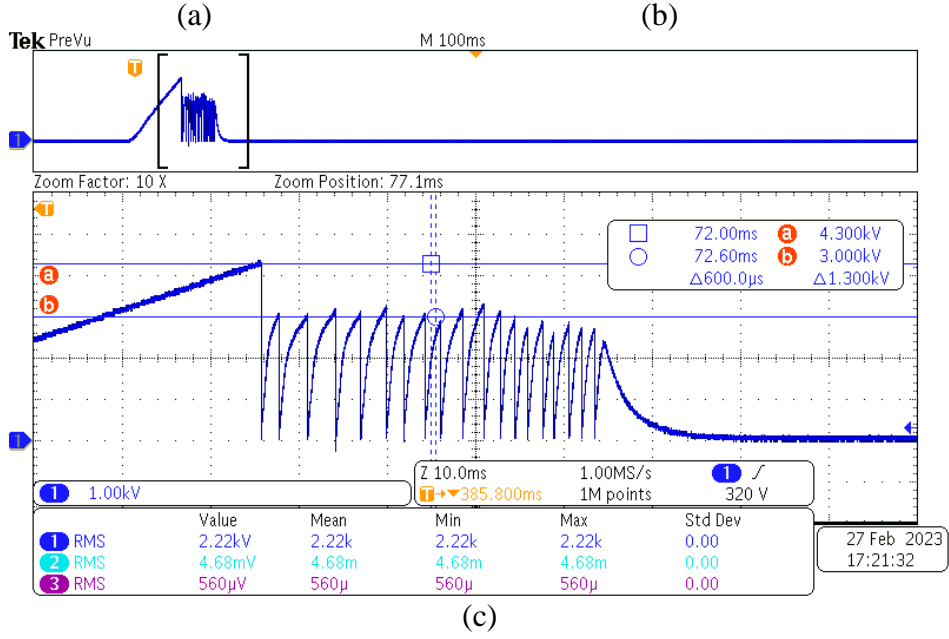


Şekil 3.1.19. (a) Gerilim dayanım test düzeneği. (b) Örnek osiloskop görüntüsü.

Kartlara uygulanan testler sonrasında ulaşılan azami çalışma gerilimleri aşağıda verilmiştir.

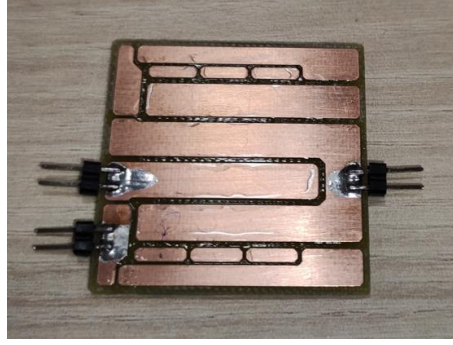
- İzolasyon mesafesi 2.0mm → 4-4.5kV
- İzolasyon mesafesi 1.5mm → 3-3.5kV
- İzolasyon mesafesi 1.0mm → 1-2.3kV

Yukarıda verilen gerilim seviyelerinde atlamaları olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.1.20’de örnek test bağlantısı, gerilim atlama anı ve gerilim atlaması sırasında osiloskop üzerinden alınan gerilim ölçümü sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.1.20. (a) Örnek test bağlantısı. (b) Gerilim atlamasının oluşması. (c) Gerilim atlaması sırasındaki osiloskop görüntüsü.

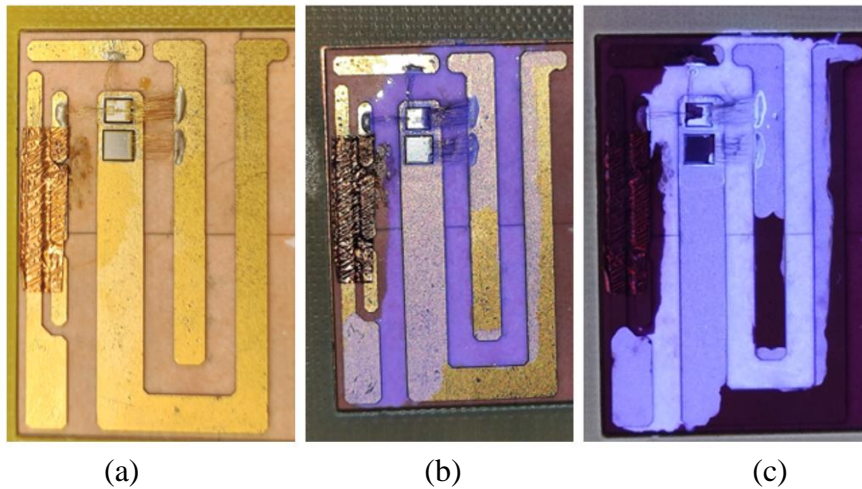
Devamında ise izolasyon mesafesi 1.0mm kart üzerine akrilik konformal kaplama (İng. acrylic conformal coating) ile gerilim dayanım seviyesi yükseltilmiştir [125]. Şekil 3.1.21'de konformal kaplama uygulanan devre kartı gösterilmiştir. Testlerin tekrarlanması sonucunda kartın gerilim dayanımı 1kV seviyelerinden 4kV seviyelere çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.1.21. İzolasyon malzemesi uygulanmış FR4 kart

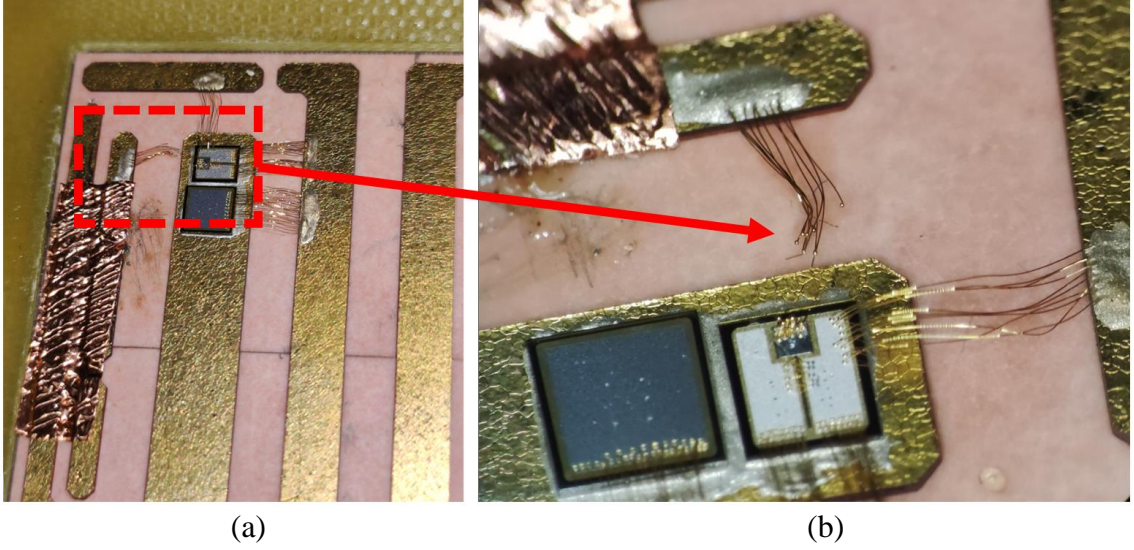
Modül paketlemede modülün gerilim seviyesini yükseltmek için genellikle silisyum jel kullanılmaktadır. Fakat tel bağlama işleminde 1mil tel kullanıldığı için silisyum jel uygulanması tellerin bükülmesi/zarar görmesine, farklı gerilim seviyesine sahip iletken yüzeylere temas etmesine neden olabilir. Ayrıca silisyum jelin yumuşak yapısı nedeniyle tellerin zarar görmesinden endişe duyulmuştur. Bu nedenle alternatif olarak akrilik konformal kaplama tercih edilmiştir. Gelecek çalışmalarda modül üretiminde kalın tel bağlama cihazının kullanılması durumunda izolasyon malzemesi olarak silisyum jel uygulanabilir.

FR4 kart üzerinde yapılan konformal kaplama alt modülü için de gerçekleştirilmiştir. İzolasyon malzemesi elektrik terminallerin olduğu bölgelere uygulanmamıştır. İzolasyon malzemesi uygulanmadan önce, uygulandıktan sonra “görünür ve UV ışık” altında ve yalnızca UV ışık altındaki görünümü sırasıyla Şekil 3.1.22’de verilmiştir.



Şekil 3.1.22. İzolasyon malzemesinin alt modüle uygulanması. (a) Uygulama öncesi görünüm. (b) Uygulama sonrası görünür ve UV ışık altındaki görünüm. (c) UV ışık altındaki görünümü.

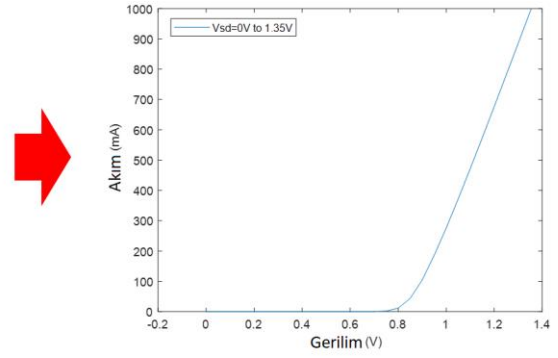
İzolasyon malzemesinin yetersiz olması veya uygulanmadığı durumunda kısa süreli gerilim değişimi nedeniyle gerilim atlaması oluşabilir ve anahtar zarar görebilir. Şekil 3.1.23'te izolasyon malzemesi olmaması durumunda anahtarlama anında oluşan gerilim atlaması ile eriyen/zarar gören tel gösterilmiştir. Zarar gören tel, düşük gerilim kapı hattı olduğu ve gerilim atlaması ile yüksek gerilime maruz kaldığı için SiC MOSFET de zarar görmüştür.



Şekil 3.1.23. Gerilim atlaması nedeniyle zarar gören alt modül. (a)Uzaklaştırılmış görünüm. (b)Yakından görünüm.



(a)

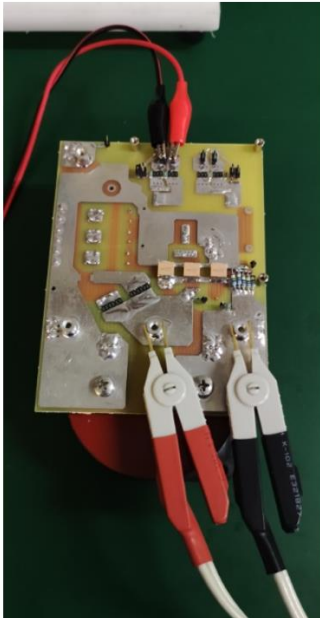


(b)

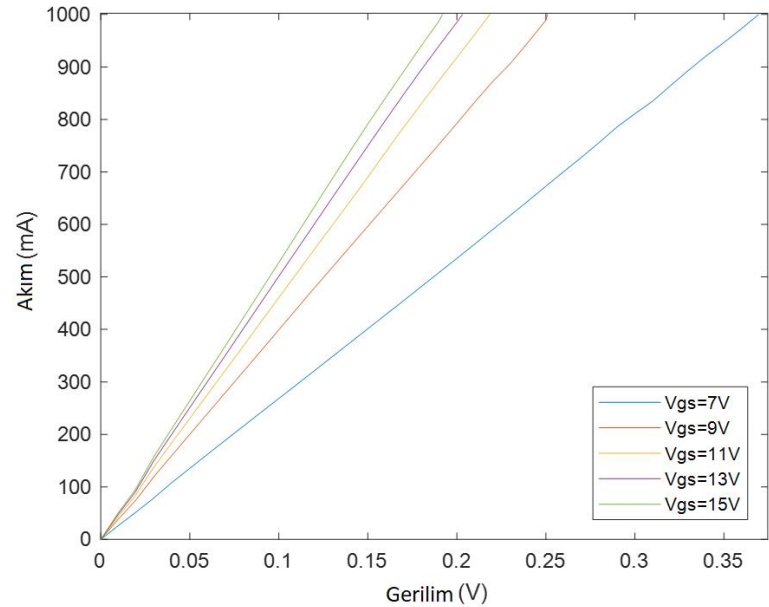
Şekil 3.2.2. Örnek ölçüm görseli. (a) Kaynakmetre üzerinde alınan ölçüm. (b)

Kaynakmetrede kaydedilen verilerin MATLAB ortamında çizdirilmesi.

SiC MOSFET'in I-V karakteristiği için gerekli bağlantılar hazırlanmıştır. “Kaynakmetre” cihazının düşük gerilimde akım limiti olduğu için 1A değerine kadar testler gerçekleştirilmiştir. “Kaynakmetre” cihazı doğrudan alt modülün “D-S” pinlerine bağlanmıştır. DC güç kaynağı ise alt modülün “G-S” pinlerine bağlanıp her test sırasında farklı kapı gerilimleri uygulanmıştır. Devre bağlantısı ve farklı kapı gerilimlerinde elde edilen akım-gerilim sonuçları Şekil 3.2.3'te gösterilmiştir. “Kaynakmetre” cihazı ile ölçüm alınan değerler mV mertebelerinde olduğu için daha doğru sonuçlar alınması amacıyla 2-telli ölçüm aleti yerine 4-telli ölçüm aletleri kullanılmıştır [126].



(a)



(b)

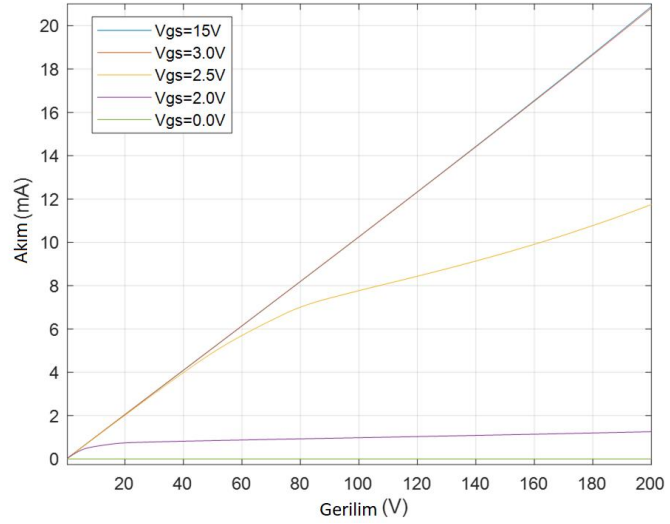
Şekil 3.2.3. Düşük gerilim ve 1A altında SiC MOSFET I-V karakteristiği-1. (a) Ölçüm

aletlerinin bağlantı sonrası görünümü. (b) Ölçüm sonuçları.

SiC MOSFET I-V karakteristiği için gerekli bağlantılar hazırlanıp 200V değerine kadar testler gerçekleştirilmiştir. “Kaynakmetre” cihazın 200V değerinde akım limiti olduğu için güç kaynağı ile alt modülün “D” pini arasına 9.837k Ω direnç bağlanmıştır. Benzer şekilde DC güç kaynağı alt modülün “G-S” pinlerine bağlanıp her test sırasında farklı kapı gerilimleri uygulanmıştır. Devre bağlantısı ve farklı kapı gerilimlerinde elde edilen akım-gerilim sonuçları Şekil 3.2.4’te gösterilmiştir.



(a)

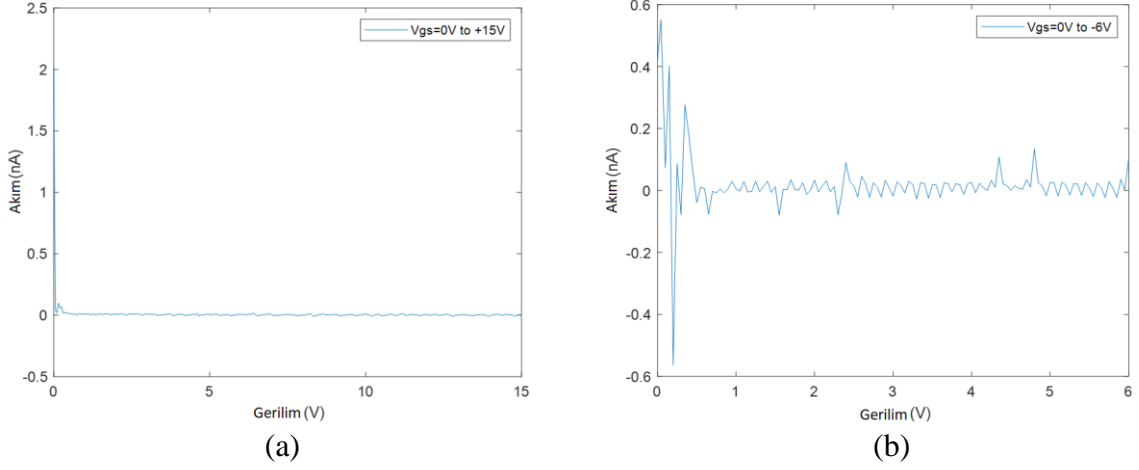


(b)

Şekil 3.2.4. 200V ve düşük akım altında SiC MOSFET I-V karakteristiği-2. (a) Ölçüm aletlerinin bağlantı sonrası görünümü. (b) Ölçüm sonuçları.

3.2.2. Kaçak Akım Testi

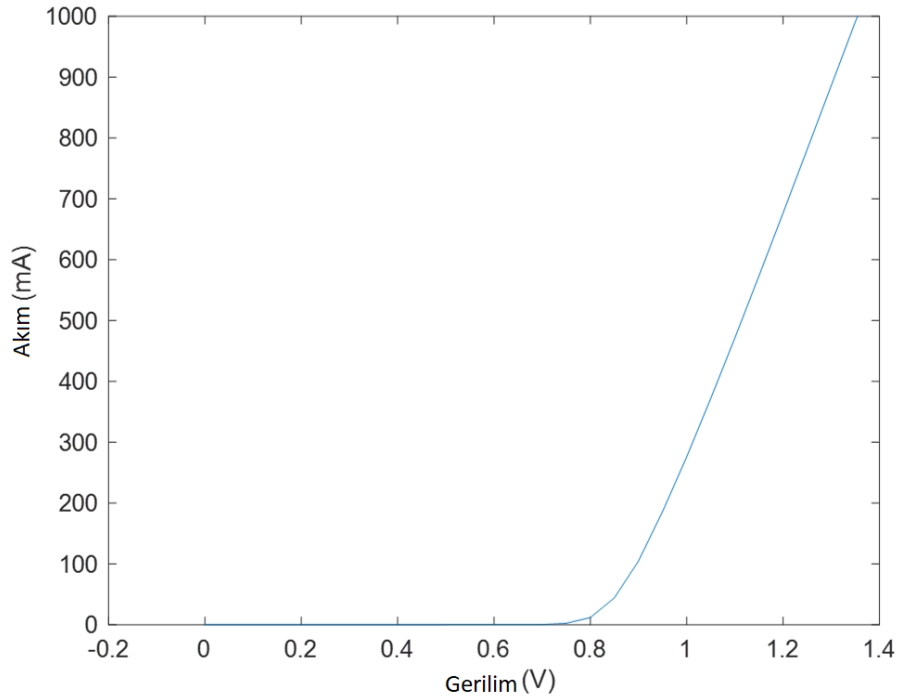
Bu başlık altında tel bağlama sonrasında herhangi bir kaçak akım oluşturabilecek bağlantının olmadığı, yonga bağlama işlemi sonrasında SiC MOSFET anahtarın kaçak akıma neden olacak şekilde zarar görmediği kontrol edilmiştir. “G-S” kaçak akım (I_{gss}) testi için alt modülün “D-S” pinleri kısa devre yapılmıştır [124, 127, 128]. Ardından “Kaynakmetre” cihazı “G-S” pinlerine bağlanmıştır. Bağlantılar hazırlandıktan sonra pozitif ve negatif kapı gerilimlerinde testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen akım-gerilim sonuçları Şekil 3.2.5’te gösterilmiştir. Şekil 3.2.5(a)’da pozitif kapı gerilimine karşılık ölçülen kaçak akım, Şekil 3.2.5(b)’de ise negatif kapı gerilimine karşılık ölçülen kaçak akım grafikleri bulunmaktadır. Yonganın veri sayfasında paylaşılan “G-S Forward Leakage Current” değeri olan G-S kaçak akım değeri “ $V_{gs} = 15V, V_{ds}=0V$ ” değerleri altında “ $I_{gss}<100nA$ ” değeri okunduğu doğrulanmıştır.



Şekil 3.2.5. Alt modül SiC MOSFET kaçak akım testi. (a) Pozitif kapı gerilimine karşılık kaçak akım grafiği. (b) Negatif kapı gerilimine karşılık kaçak akım grafiği.

3.2.3. Ters-Paralel (Anti-Paralel) Diyot I-V Karakteristik

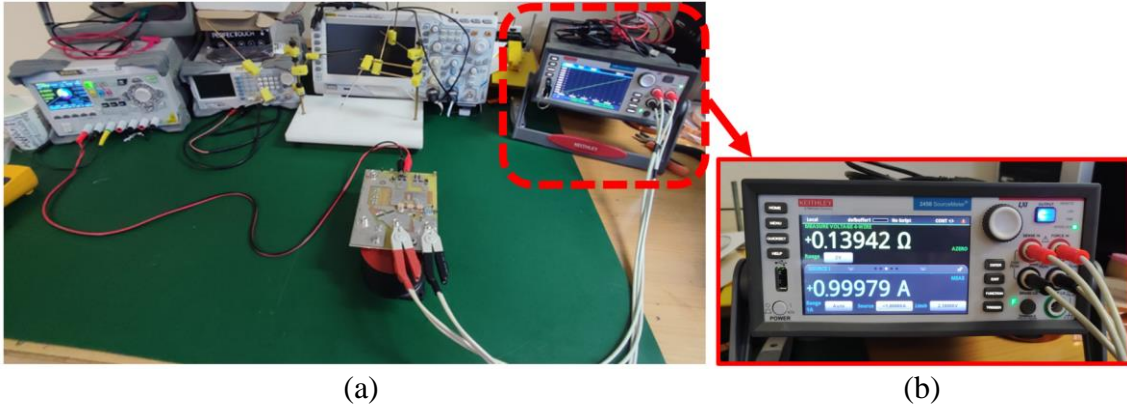
Test-paralel diyot I-V karakteristiği için “Kaynakmetre” cihazı alt modülün “S-D” pinlerine bağlanıp 1A değerine kadar testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen akım-gerilim sonuçları Şekil 3.2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.2.6. Alt modül test-paralel SiC Diyot I-V Karakteristiği

3.2.4. $R_{ds(on)}$ İletim Direnci Ölçümü

Alt modülün iletim direncinin ölçümü sırasında daha doğru ölçümler alabilmek için “3.2.1. Düşük Gerilim ve Düşük Akım ile I-V Karakteristiği” başlığında da bahsedildiği gibi ölçüm cihazının “4-Tel, Ofset Kompanzasyon, 10 Tekrar” modları kullanılmıştır. Test sırasında SiC MOSFET I-V karakteristik testlerindeki gibi “Kaynakmetre” cihazı doğrudan alt modülün “D-S” pinlerine bağlanmıştır. DC güç kaynağı ise alt modülün “G-S” pinlerine bağlanıp her test sırasında farklı kapı gerilimleri uygulanmıştır. Örnek test devresi ve ölçümü Şekil 3.2.7’de gösterilmiştir. Ardından farklı kapı gerilimlerinde alınan direnç ölçümleri Çizelge 3.2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.7. Farklı kapı geriliminde iletim direnci ölçümü. (a) Ölçüm aletlerinin bağlantı sonrası görünümü. (b) Ölçüm sonuçları.

Çizelge 3.2.1. Farklı kapı gerilimlerine karşılık 2-Tel ve 4-Tel ölçüm yöntemiyle alınan iletim direnç sonuçları

Ölçüm Yöntemi (2-Tel / 4-Tel)	Kapı Gerilimi (V)	I_D Akım (mA)	$R_{ds(on)}$ (Ω)
2-Tel Ofset Kompanzasyon Kapalı 1 Tekrar	5.0	1000	1.9590
	7.5	1000	0.6475
	10.0	1000	0.5453
	12.5	1000	0.5152
	15.0	1000	0.5026
4-Tel Ofset Kompanzasyon Açık 10 Tekrar	5.0	1000	1.3511
	7.5	1000	0.2678
	10.0	1000	0.1772
	12.5	1000	0.1509
	15.0	1000	0.1394

SiC MOSFET yonganın veri sayfasında $R_{ds(on)}$ direncinin “ $V_{gs}=15V$ ” değerinde $75m\Omega$ mertebelerinde olduğu belirtilmiştir. Ölçülen değerler $m\Omega$ mertebelerindedir ve ölçüm için kullanılan ölçüm aletlerinin kabloları da $m\Omega$ seviyelerinde dirençleri vardır. Ölçüm

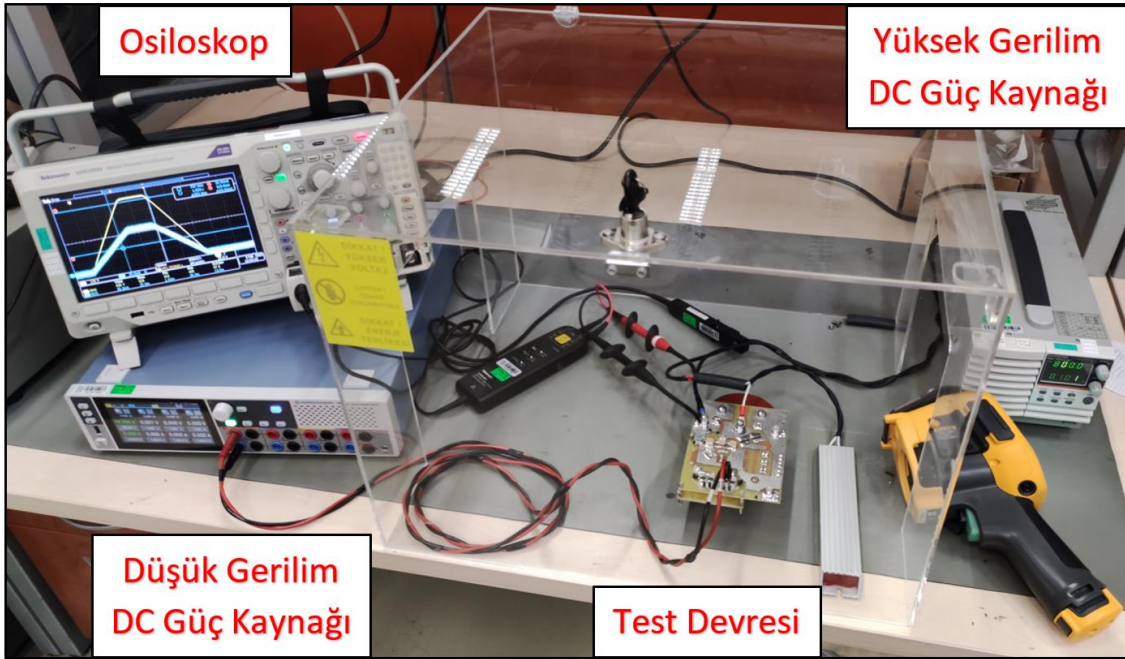
aletin kablo dirençlerini ihmal etmek için 2-telli ölçüm yöntemi yerine 4-telli ölçüm yöntemi tercih edilmiştir. Verilen çizelgede ölçüm yöntemi 4-tel olarak seçildiğinde 2-telli ölçüme kıyasla daha doğru sonuçlar elde edildiği ve ölçüm kablosundan kaynaklı direncin ihmal edildiği görülmektedir. Bu nedenle 2-telli ölçüm yöntemi yerine 4-telli ölçüm yöntemi ile alınan veriler kullanılmıştır. Direnç ölçümünde alt modülün $R_{ds(on)}$ direnci " $V_{gs}=15V$ " değerinde $139.4m\Omega$ olarak ölçülmüştür. Bu değerden SiC MOSFET yongasının direnci ($75m\Omega$) çıkartıldığında; tel bağlama, alt modül devre tasarımı, kullanılan yaylı pinler gibi etmenlerden kaynaklı direnç değeri $64.4m\Omega$ olarak hesaplanmıştır.

3.3. Yüksek Gerilim Test Çalışmaları-1

3.3.1. Yüksek Gerilim ve Düşük Akım ile I-V Karakteristik

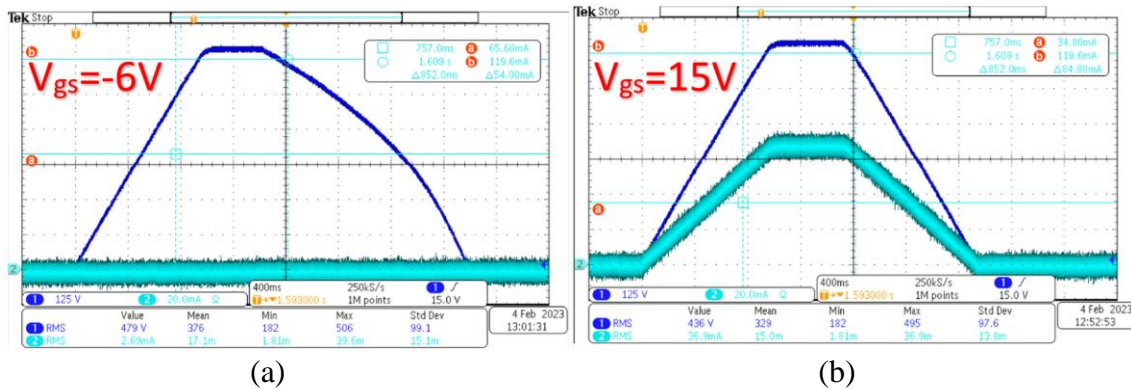
Bu başlık altında doğrudan yüksek gerilim ve yüksek akım testlerine geçmek yerine öncelikle yüksek gerilim ve düşük akım ile testler gerçekleştirilmiştir. Ardından düşük gerilim ve yüksek akım altında yapılan testler anlatılmıştır. Bu testler tamamlandıktan sonra da "3.4. Yüksek Gerilim Test Çalışmaları-2" başlığında anlatılan yüksek gerilim ve yüksek akım testlerine geçilmiştir. Bahsedilen şekilde ilerlememizin nedeni doğrudan yüksek gerilim ve yüksek akım testleriyle başlanması durumunda paketlemeden veya çevresel etmenlerden kaynaklı herhangi bir hata olması sonucunda alt modülde kalıcı hataların oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle gerçekleştirilen testler, uygulama sırasına göre anlatılmıştır.

Yüksek gerilim (800V) ve düşük akım (0.9A) sağlayabilen "Yüksek Gerilim DC Güç Kaynağı" ile alt modülün akım-gerilim (I-V) karakteristiğinin elde edilmesi için Şekil 3.3.1'de gösterilen test düzeneği kurulmuştur. Akımı sınırlamak için yüksek gerilim DC güç kaynağı ile test devresinin arasına $11.56k\Omega$ direnç bağlanmıştır. Test devresinin kapı-kaynak (V_{gs}) çıkışları ise düşük gerilim DC güç kaynağına bağlanmıştır. Testler sırasında 15A akım tabancası (CH2) ve 1500V gerilim probu (CH1) kullanılmıştır. Osiloskop yardımıyla ölçümler ".png" ve ".csv" formatında kaydedilip MATLAB ile grafik oluşturulmuştur.



Şekil 3.3.1. Yüksek gerilim ve düşük akım test düzeneği

Alt modüldeki SiC MOSFET'in I-V karakteristiği için gerekli bağlantılar tamamlandıktan sonra 800V değerine kadar testler gerçekleştirilmiştir. SiC MOSFET "G-S" pinlerine düşük gerilim DC güç kaynağı ile sırasıyla "-6V" ve "+15V" gerilimleri uygulanıp yüksek gerilim DC güç kaynağı ile kısa süreli gerilim uygulanmıştır. Elde edilen osiloskop görüntüleri Şekil 3.3.2'de gösterilmiştir.

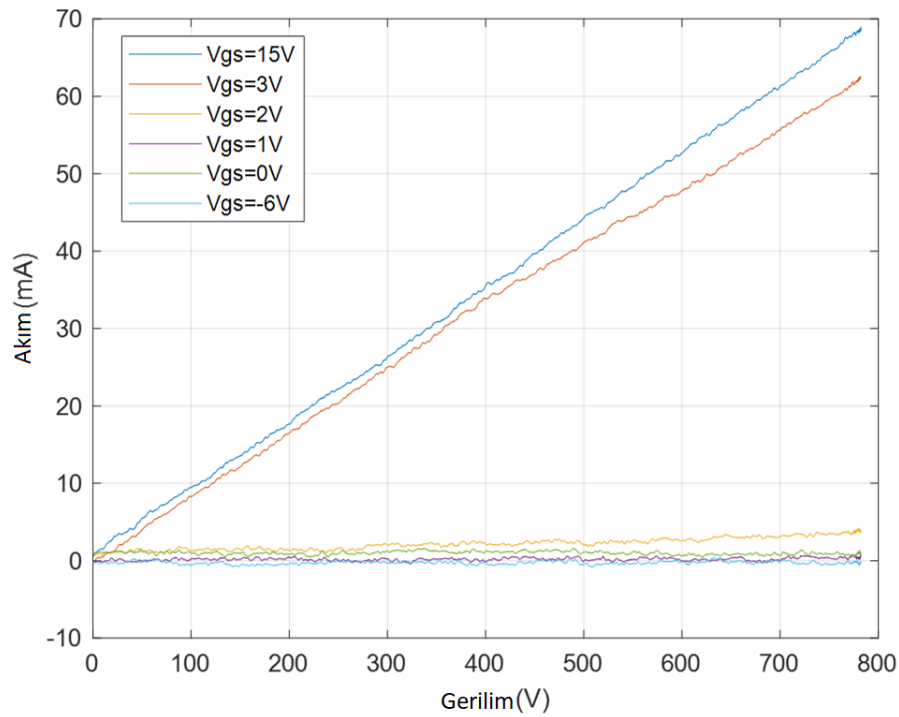


Şekil 3.3.2. Yüksek gerilim düşük akım osiloskop sonuçları. (a) Kapı gerilim -6V uygulandığında. (b) Kapı gerilimi +15V uygulandığında.

Şekil 3.3.2(b)'de kapı gerilimi +15V iken SiC MOSFET iletme geçmiştir. Yüksek gerilim DC güç kaynağının gerilimi doğrusal olarak artarken 11.56kΩ direnç bağlı olduğu için anahtar üzerinden geçen akım da doğrusal olarak artmaktadır. Benzer şekilde gerilim doğrusal olarak azalırken akım da doğrusal olarak azalmaktadır. Fakat kapı-kaynak

arasına -6V uygulandığı zaman SiC MOSFET iletimden çıkar ve üzerinden akım geçmesine izin vermez. Bu nedenle Şekil 3.3.2(a)'da yüksek gerilim DC güç kaynağı ile gerilim uygulandığında okunan akım sıfırdır. Ayrıca güç kaynağı geriliminin doğrusal olarak azaltamamasının nedeni ise SiC MOSFET iletimde olmadığı için güç kaynağının içerisindeki deşarj direnci üzerinden gerilim azalmasıdır.

Benzer ölçümler farklı kapı gerilimlerinde tekrarlanıp MATLAB ortamına aktarılmıştır. Hazırlanan grafik Şekil 3.3.3'te verilmiştir. Şekil 3.3.3'te gösterildiği gibi V_{gs} gerilimi 2V değerine ulaşana kadar I_D akım değeri 0mA mertebelerindedir. Kapı gerilimi arttıkça SiC MOSFET üzerinden geçen akım değeri artmaktadır. Kapı gerilimi 3V'u geçtikçe SiC MOSFET neredeyse tamamıyla açılıp ilettime geçer. Kapı gerilimi 15V'a ulaştığında da anahtar tamamıyla ilettime geçmektedir. Şekil 3.3.3 incelendiğinde üretilen alt modülün 800V akaç-kaynak gerilimine kadar düşük akımlarda çalıştırıldığı doğrulanmıştır.



Şekil 3.3.3. Yüksek gerilim düşük akım altında SiC MOSFET I-V karakteristiği

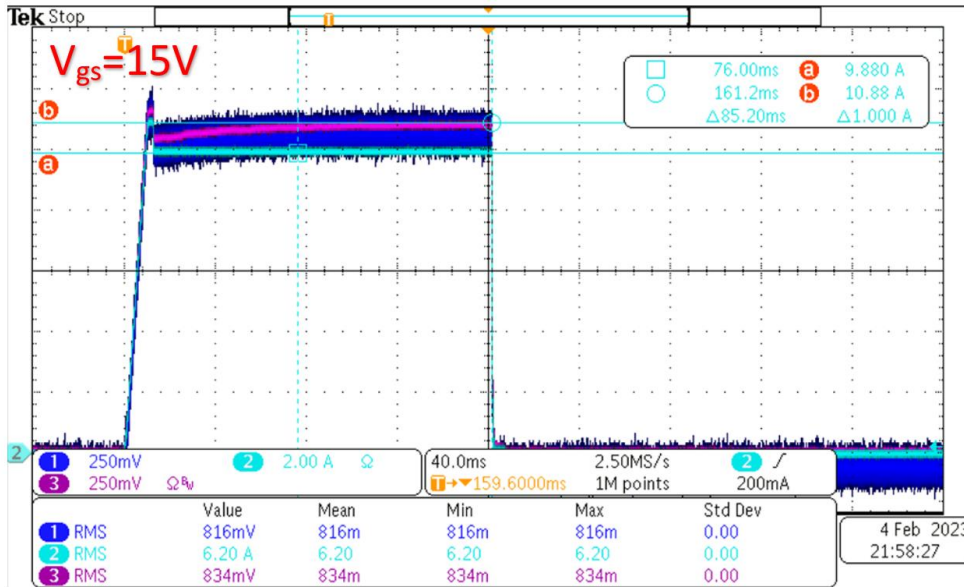
3.3.2. Düşük Gerilim ve Yüksek Akım I-V Karakteristiği

Hazırlanan alt modülün güç hattında 30 adet 1mil altın tel paralel bağlanmıştır. “2.2.3. Yonga Bağlama” kısmında verilen bilgiler doğrultusunda 30 paralel tel için sağlanabilecek sürekli akım taşıma kapasitesi 20A mertebelerindedir. Testler sırasında kısa süreli anahtarlama gerçeştirilip ölçümler alındığı için %50 güvenlik payı ile

30A tepe akımı geçmemesi hedeflenmiştir. Testler sırasında anlık akım yükselmesi gibi durumlar olabileceği için alt modülün test edileceği azami akım değeri 20A olarak belirlenmiştir. Fakat bu çalışmada yüksek gerilim ve yüksek akım testlerine geçmeden önce daha güvenli ilerlenmesi adına düşük gerilim ve yüksek akım testleri gerçekleştirilecektir.

Şekil 3.3.1’den farklı olarak yüksek gerilim DC güç kaynağı yerine düşük gerilim DC güç kaynağının çıkışları alt modülün “D-S” ve “G-S” hatlarına herhangi bir direnç kullanmadan bağlanmıştır. Güç kaynağından 10A uygulanıp farklı kapı-kaynak gerilimlerinde akım-gerilim (I-V) karakteristiğinin elde edilmiştir. Anahtarın kapı sinyali güç kaynağı tarafından manuel olarak kontrol edilmektedir.

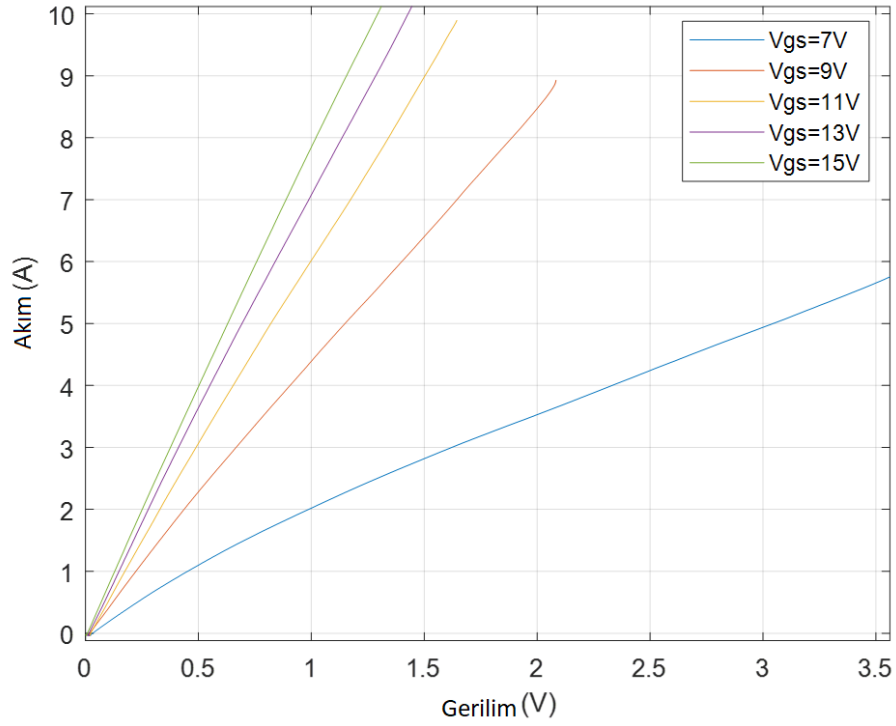
Bir önceki çalışmaya benzer şekilde osiloskop yardımıyla ölçümler “.png” ve “.csv” formatında kaydedilip MATLAB ile grafik oluşturulmuştur. Testler sırasında 15A akım tabancası (CH2), 4.5V/45V gerilim probu (CH3) ve 1500V gerilim probu (CH1) kullanılmıştır. Kapı gerilimi 15V iken elde edilen osiloskop görüntüsü Şekil 3.3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3.4. Düşük gerilim yüksek akım SiC MOSFET osiloskop sonucu

Farklı kapı gerilimlerinde alınan ölçümler kullanılarak MATLAB ortamında hazırlanan grafik Şekil 3.3.5’te gösterilmiştir. Bu grafik, üretilen SiC MOSFET alt modülün 0-10A aralığındaki I-V karakteristiğine karşılık gelmektedir. Belirtilen şekil kullanılarak I_D akımına karşılık gelen gerilim değerleri Çizelge 3.3.1’de verilmiştir. Üretilen SiC

MOSFET alt modül paketinden alınan bu değerler, referans alınan SiC MOSFET ayırık anahtarın veri sayfasındaki verilerle karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

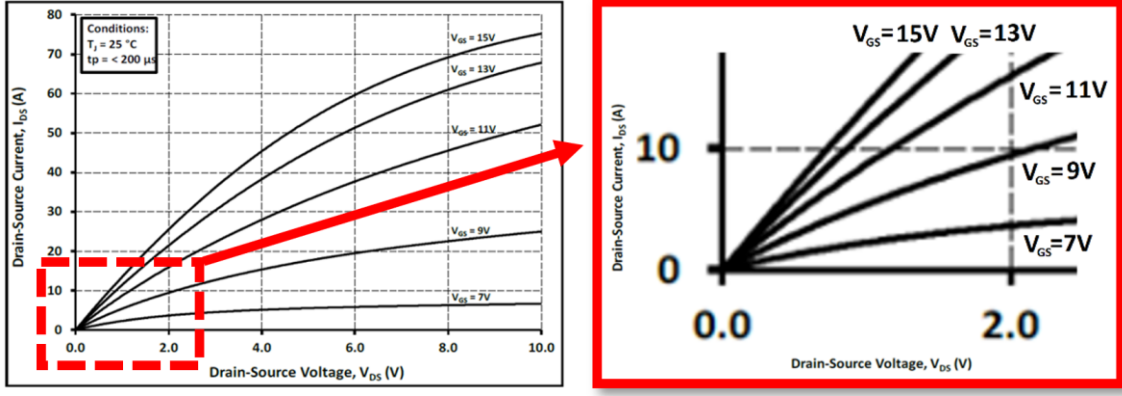


Şekil 3.3.5. Üretilen SiC MOSFET alt modülün I-V karakteristiği

Çizelge 3.3.1. Alt modülün 0-10A değerindeki gerilim değerleri

		V_{ds} Gerilim Değerleri (Ölçüm)									
		1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
V_{gs}	15V	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.76	0.89	1.02	1.16	1.29
	13V	0.15	0.28	0.41	0.55	0.69	0.84	0.99	1.14	1.29	1.43
	11V	0.17	0.33	0.49	0.65	0.82	1.00	1.17	1.34	1.50	1.66
	9V	0.22	0.44	0.67	0.91	1.15	1.40	1.65	1.89	2.10	-
	7V	0.45	0.99	1.62	2.33	-	-	-	-	-	-

Referans alınan SiC MOSFET ayırık anahtarın veri sayfasındaki [103] I-V karakteristiği ve 0-10A akım aralığındaki yakınlştırılmış görseli Şekil 3.3.6'da verilmiş olup ilgili akımdaki gerilim değeri Çizelge 3.3.2'de gösterilmiştir. Testlerde azami 10A uygulandığı için I-V grafiğinin 0-10A aralığındaki değerler alınmıştır. Bahsedilen çizelgedeki veriler üretilen alt modülden alınan verilerle karşılaştırılmasında kullanılmıştır.



Şekil 3.3.6. SiC MOSFET ayırık anahtar I-V karakteristiği [103]

Çizelge 3.3.2. Ayırık SiC MOSFET anahtarın 0-10A değerindeki gerilim değerleri

V_{gs}	V_{ds} Gerilim Değerleri (Veri Sayfası)										
	I_D	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
15V		0.09	0.15	0.23	0.30	0.37	0.44	0.53	0.58	0.65	0.73
13V		0.09	0.17	0.26	0.35	0.43	0.51	0.61	0.69	0.78	0.87
11V		0.12	0.22	0.34	0.45	0.56	0.67	0.79	0.91	1.04	1.17
9V		0.18	0.35	0.53	0.72	0.91	1.12	1.36	1.60	1.87	2.13
7V		0.37	0.83	1.47	2.32	-	-	-	-	-	-

Çizelge 3.3.1 ve Çizelge 3.3.2'deki veriler kullanılarak üretilen SiC MOSFET alt modülden alınan ölçümler ile referans alınan SiC MOSFET ayırık anahtarın veri sayfasındaki değerler karşılaştırılmıştır. Ölçümler arasındaki yüzdelik farkın hesaplanmasında aşağıdaki formül (Eşitlik 44) kullanılmıştır. Gerilim değerleri arasındaki hesaplanan yüzdelik farklar Çizelge 3.3.3'te verilmiştir.

$$\bullet \text{ Yüzdelik Fark} = \frac{\text{Ölçüm} - \text{Referans}}{\text{Referans}} \times 100 \quad (44)$$

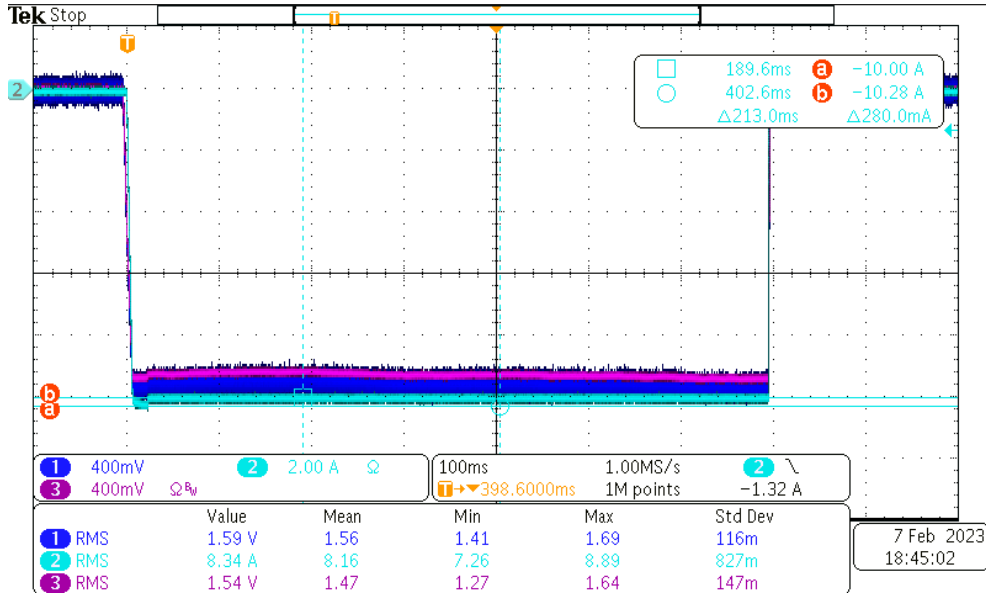
Çizelge 3.3.3. Alt modül ile ayırık SiC MOSFET anahtar gerilimlerinin karşılaştırması

V_{gs}	V_{ds} Gerilim Değerleri (Karşılaştırma)										
	I_D	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
15V		%51.8	%70.3	%67.9	%66.8	%71.7	%72.6	%67.3	%75.5	%77.3	%77.2
13V		%63.5	%63.5	%59.6	%57.8	%61.2	%63.5	%63.5	%66.4	%66.1	%63.5
11V		%46.3	%49.9	%45.7	%45.6	%47.3	%48.6	%48.3	%48.0	%44.3	%41.4
9V		%24.0	%26.2	%25.9	%26.1	%27.0	%25.1	%21.0	%18.4	%12.6	-
7V		%20.6	%19.0	%9.9	%0.5	-	-	-	-	-	-

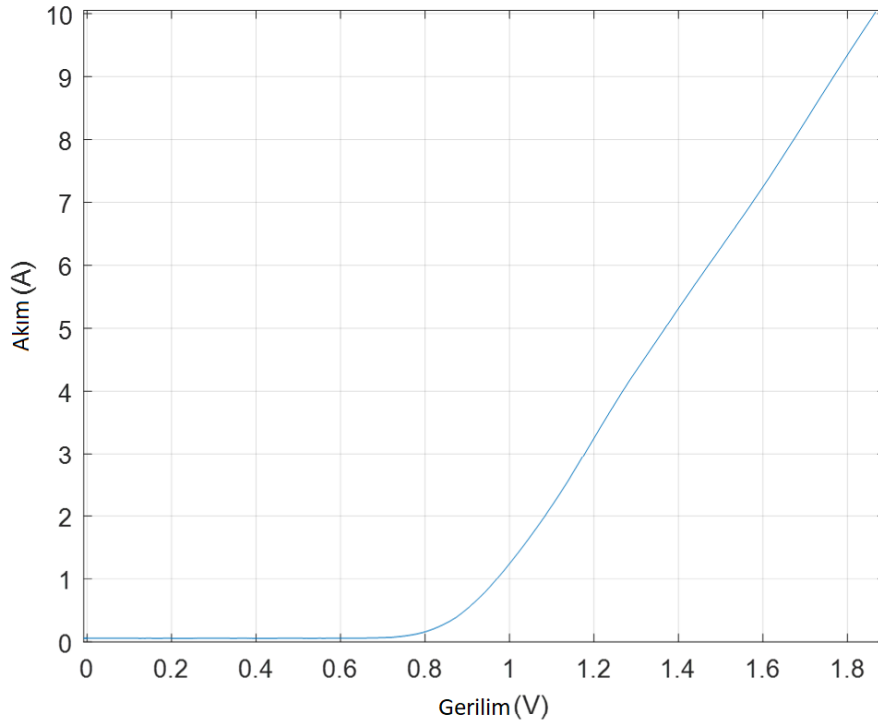
Karşılaştırma tablosu Çizelge 3.3.3'te verilmiştir, fakat referans alınan SiC MOSFET ayırık paket yapısındadır. Üretilen SiC MOSFET ise modül tipi paketlemeye örnektir.

Paket yapıları ve tasarımları birbirinden farklı olduğu için aralarında fark olması beklediğimiz bir sonuçtur. Fakat çizelgedeki yüzdelerdeki farkların nedenlerinden biri alt modülün devre yapısı, yaylı pinler ve kullanılan teller gibi etmenlerden dolayı alt modül direnci artmasıdır. “3.2.4. $R_{ds(on)}$ İletim Direnci Ölçümü” başlığındaki alt modülün $R_{ds(on)}$ direnç ölçüm kısmında da bu çevresel etmenler detaylı anlatılmıştır. Bu nedenlerden dolayı hesaplanan V_{ds} gerilimindeki yüzdelerdeki fark yüksek çıkmıştır. Kapı-kaynak gerilimi arttıkça hesaplanan V_{ds} gerilimindeki farkın daha da yüksek olmasının bir diğer nedeni ise kapı gerilimi arttıkça SiC MOSFET anahtarın $R_{ds(on)}$ direncinin düşmesidir. SiC MOSFET anahtarın $R_{ds(on)}$ direnci düştükçe de modül ve çevresel etmenlerden kaynaklı direnç değerleri daha baskın hale gelmektedir. Örneğin Çizelge 3.3.3’teki 10A sütununu incelediğimizde 11V kapı-kaynak gerilimindeki yüzdelerdeki fark %41.4 iken, 13V uygulandığında %63.5’e çıkmakta, 15V uygulandığında ise %77.2’ye ulaşmaktadır. Benzer durum diğer akım değerleri için de geçerlidir.

Alt modül içerisindeki SiC MOSFET’in I-V karakteristiği oluşturulduktan sonra yine alt modül içerisinde bulunan ters-paralel diyotun I-V karakteristiği için gerekli bağlantılar hazırlanmıştır. Aynı test devresi kullanılmıştır, fakat bu sefer güç kaynağı doğrudan alt modülün “D-S” hatlarına bağlamak yerine “S-D” hatlarına bağlanmıştır. Bu bağlantı değişikliği ile ters-paralel diyotun üzerinden akım geçmesi sağlanmıştır. Ayrıca “G-S” pinleri kısa devre yapılmıştır. 10A değerine kadar testler gerçekleştirilmiş olup 10A değerinde alınan osiloskop görüntüsü Şekil 3.3.7’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde güç kaynağı çalıştırılıp gerilimin artmaya başladığı, fakat diyotun V_F değerine ulaşana kadar akım geçirmediği, diyotun veri sayfasında [77] belirtilen 0.8V değerini geçtikten sonra akım geçirmeye başladığı gösterilmek istenmiştir. Fakat zaman ekseninde bunun anlaşılması zor olduğu için alınan ölçüm MATLAB ortamına aktarılıp akım-gerilim grafiği oluşturulmuştur ve Şekil 3.3.8’de verilmiştir. Alt modülden alınan ölçüm sonuçları Çizelge 3.3.4’teki “Gerilim (V) (Alt Modül Ölçüm)” satırına eklenmiştir.

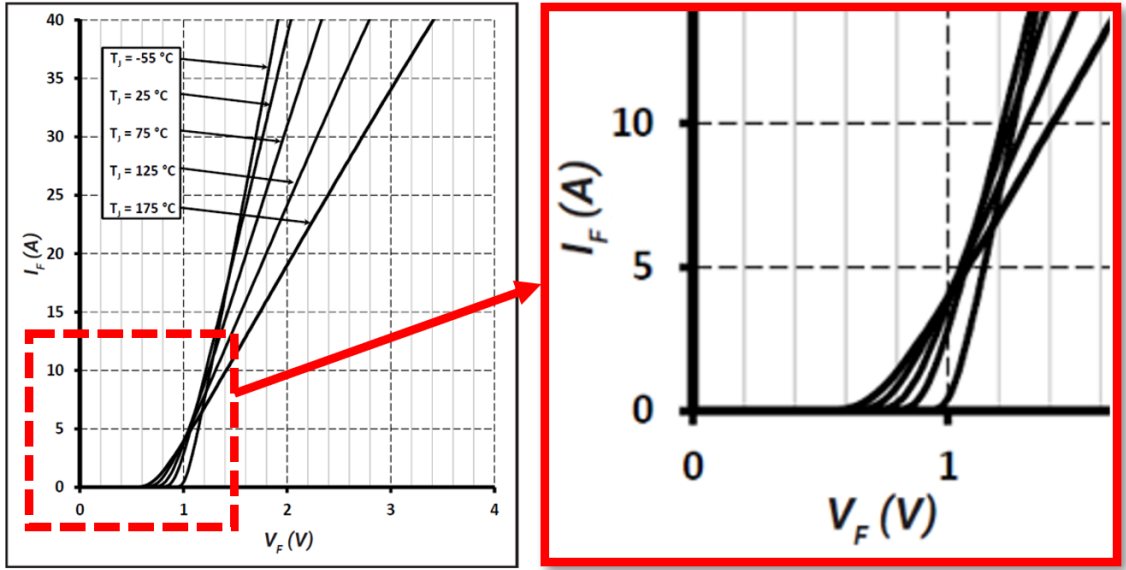


Şekil 3.3.7. Yüksek akımda alt modüldeki ters-paralel diyotun osiloskop sonucu



Şekil 3.3.8. Yüksek akım altında alt modüldeki ters-paralel diyotun I-V karakteristiği

Bu kısımda ters-paralel diyotun veri sayfasındaki [77] I-V karakteristiği ve 0-10A akım aralığındaki yakınlaştırılmış görseli Şekil 3.3.9’da verilmiş olup ilgili akımlardaki gerilim değeri Çizelge 3.3.4’teki “Gerilim (V) (Veri Sayfası)” satırına eklenmiştir. Çizelge 3.3.4’te hem alt modülden alınan ölçümler hem de diyotun veri sayfasından alınan değerler Çizelge 3.3.3’teki gibi (44) numaralı formül kullanılarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3.9. Ayrık anahtarın ters-paralel diyotun I-V karakteristiği [77]

Çizelge 3.3.4. Alt modül ile ayrık anahtar gerilim değerleri ve karşılaştırması

Akım (A)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gerilim (V) (Veri Sayfası)	0.90	0.97	1.01	1.04	1.08	1.11	1.15	1.17	1.19	1.24
Gerilim (V) (Alt Modül Ölçüm)	0.97	1.08	1.18	1.27	1.37	1.47	1.58	1.67	1.77	1.86
Karşılaştırma (%)	%7.4	%11.9	%17.2	%21.9	%27.3	%32.3	%37.9	%43.1	%48.2	%50.5

Çizelge 3.3.4'te hem alt modülden alınan ölçümler hem de diyotun veri sayfasındaki aynı akımlarda alınan gerilim değerlerinin karşılaştırıldığı belirtilmiştir. Çizelgeyi incelediğimizde 1A değerindeki yüzdelik fark %7.4 iken, 5A'de %27.3 ve 10A'de ise %50.5'e kadar gerilim değerleri arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Çizelge 3.3.3'ün altındaki SiC MOSFET karşılaştırma kısmında bahsedilen durum ters-paralel diyot için de geçerlidir. Alt modül, yaylı pin ve test devresinden kaynaklı direnç nedeniyle alt modül ölçüm sonuçları, diyotun veri sayfasındaki gerilim değerlerinden yüksek çıkmaktadır. Akım arttıkça da alt modül ve çevresel etmenlerden kaynaklı direnç üzerindeki gerilim düşümü artıp daha baskın hale gelmektedir. Bunun sonucunda da alt modül ölçümündeki diyotun V_{sd} geriliminin etkisi azalmaktadır.

3.3.3. Direnç Yüğü ile Anahtarlama Testleri

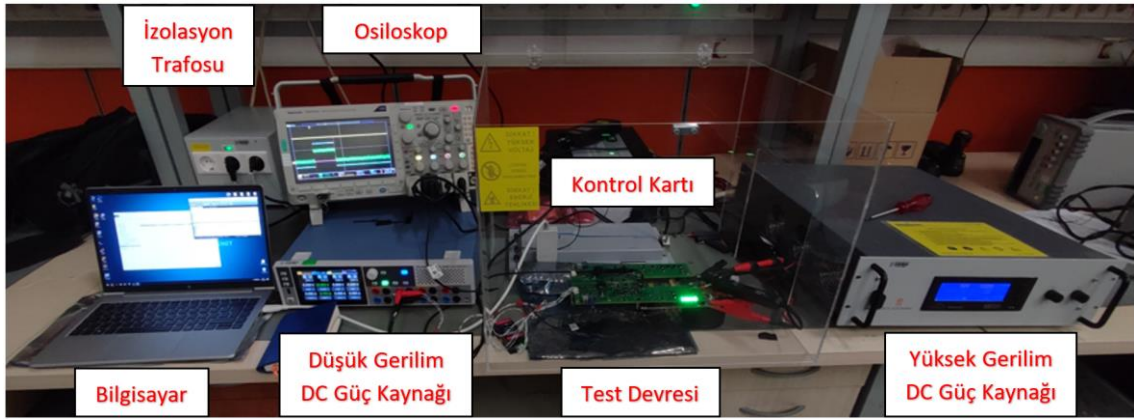
Bu kısma kadar alt modül anahtarlama güç kaynağı ile manuel olarak kontrol edilmekteydi ve gerilim değişimleri milisaniye mertebelerindeki doğrusal rampa ile oluşturulmaktaydı. Bu test başlığı altında ise kapı sürücü kartı ve kontrol kartı üzerinden anahtarlama testleri gerçekleştirilecektir. Test yazılımı 900us iletimde olan kare dalga üretecek şekilde ayarlanmıştır. Bilgisayar aracılığıyla denetleyici alan ağı (İng, controller area network, CAN) üzerinden kontrol kartına gönderilen sinyal sonrasında bahsedilen kare dalga üretilip ölçümler alınmıştır.

DPT test devresinde “3.4.1. Bobin Yüğü ile Anahtarlama Testleri” başlığında detaylı olarak anlatıldığı gibi bobin kullanılmaktadır. DPT testi sırasında üretilen ilk kare dalgada bobin üzerinden akım geçirilerek enerjinin bobinde depolanması sağlanır. İkinci kare dalgada ise ulaşılan akım altındaki anahtarlama verileri alınır. Test yazılımında yanlış sinyal verilmesi durumunda bobin üzerinden fazla akımın geçmesine, devamında da SiC MOSFET’in taşıyabileceği azami akımı aşmasıyla alt modülün zarar görmesine neden olabilir. Ayrıca önceki testlerden farklı olarak gerilim değişiminin nanosaniye mertebelerinde olmasıyla oluşabilecek gürültü, çınlama (İng, ringing) veya yüksek tepe gerilimleri nedeniyle alt modül içerisindeki anahtarların yanlışlıkla açılmasına, devamında da SiC MOSFET anahtarın iletim süresinin artmasına ve yüksek akım geçmesiyle sonuçlanabilir [129]. Bahsedilen durumlardan dolayı SiC MOSFET alt modülde kalıcı hasarların oluşmasından endişe duyulmuştur. Bu nedenle DPT devresine geçmek yerine öncelikle daha güvenli olan ve bu başlık altında anlatılan direnç yüğü ile anahtarlama testleri gerçekleştirilmiştir.

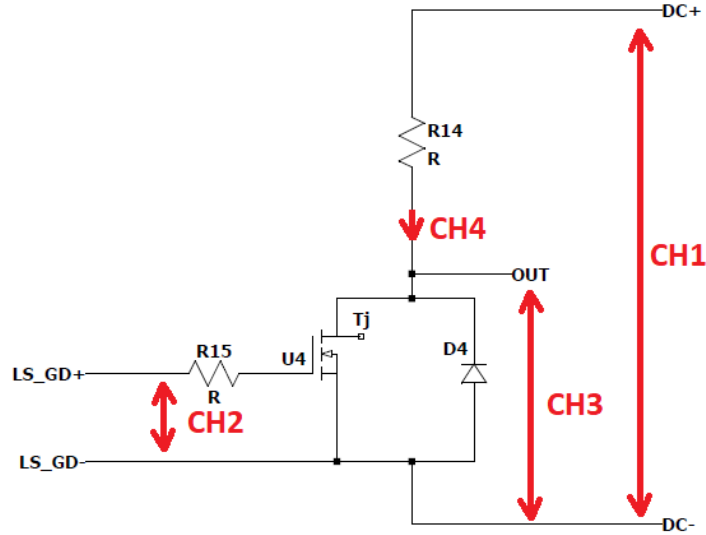
Düşmezer’in kapı sürücü kartı, değiştirilebilir kapı gerilimleri oluşturabilmesi nedeniyle incelenmiştir [130]. Kapı sürücü kartının pozitif ve negatif çıkış gerilimleri ilgili entegrelerin dirençleri değiştirilerek +15V/-4V olacak şekilde ayarlanmıştır. Kapı direnci ise çalışmalara ilgili başlıklar altındaki ihtiyaca göre güncellenmiştir.

Kurulan test düzeneğinin görseli Şekil 3.3.10’da verilmiştir. Test düzeneğinde osiloskop, osiloskobu beslemek için izolasyon trafosu, komut vermek için bilgisayar, kontrollü kare dalga oluşturulması amacıyla kullanılan kontrolcü kartı, düşük ve yüksek gerilim DC güç kaynağı bulunmaktadır. Kurulan devre ve ölçüm aletlerinin bağlantıları Şekil 3.3.11’de verilen devre şemasında gösterilmiştir. Şekil 3.3.11’de bahsedilen “CH1, CH2, CH3, CH4” isimlendirmeleri osiloskobun sırasıyla birinci (sarı renkli), ikinci (mavi renkli),

üçüncü (mor renkli) ve dördüncü (yeşil renkli) kanallarına karşılık gelmektedir. Bu başlık altında paylaşılan tüm osiloskop görüntüleri için bu isimlendirmeler dikkate alınmalıdır.



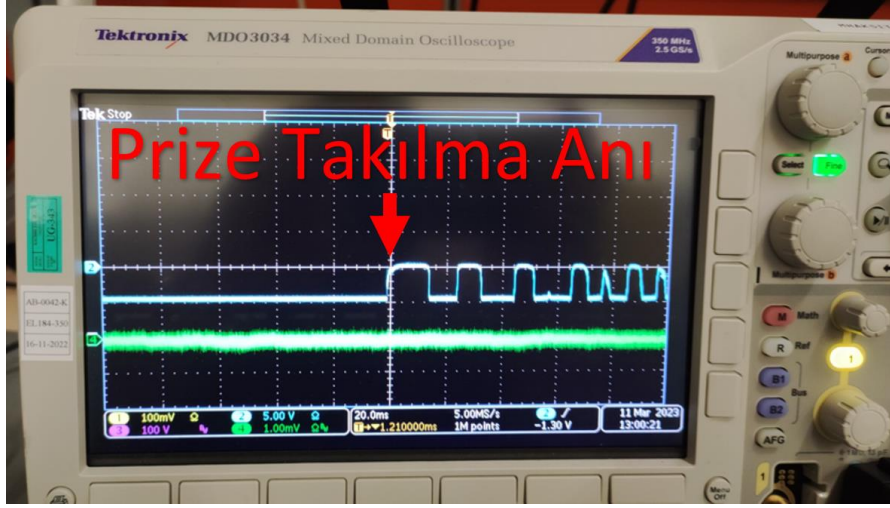
Şekil 3.3.10. Yüksek gerilim anahtarlama test düzeneği



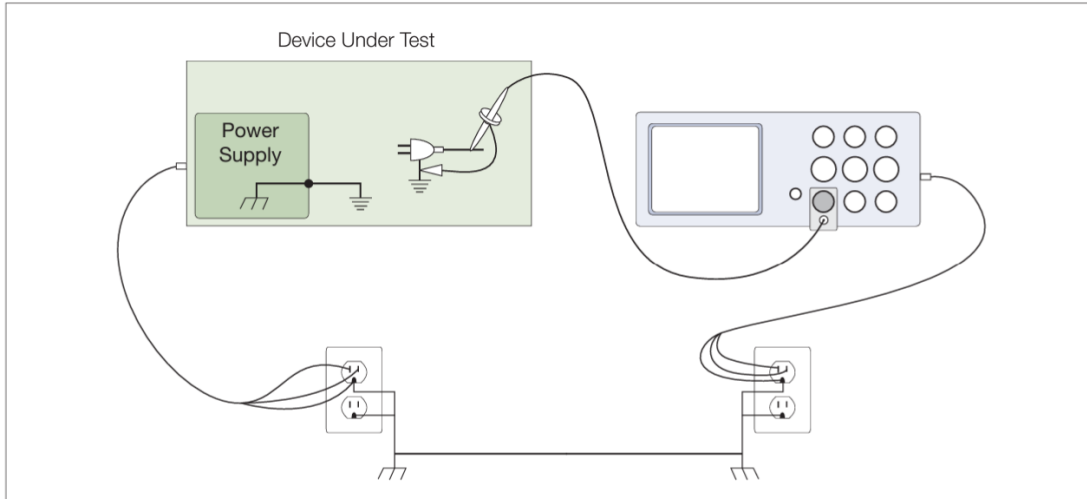
Şekil 3.3.11. Test devresi ve ölçüm aleti bağlantıları

Ölçümler hakkında bilgi vermeden önce osiloskop güç beslemesinin neden izolasyon trafosundan alındığı kısaca anlatılmıştır. İzolasyon trafosu kullanılmadan önce yüksek gerilim DC güç kaynağı dışındaki tüm cihazlar aynı şebeke hattına bağlanmıştır. Ardından Şekil 3.3.10'da gösterilen yüksek gerilim DC güç kaynağının besleme kablosu 3-faz prize takılmıştır. Prize takıldığı zaman osiloskobun CH2 kanalındaki V_{gs} gerilimi sabit -4V olması gerekirken kare dalga gerilimlerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Yüksek gerilim DC güç kaynağının besleme kablosu prizden söküldüğü zaman ise kapı gerilim ölçümünün düzeldiği görülmüştür. Yüksek gerilim DC güç kaynağı besleme kablosunun prize takılması sırasında oluşan kapı-kaynak gerilimi Şekil 3.3.12'de paylaşılmıştır.

Paylaşılan görselde tetikleme öncesi kaynağın besleme kablosu takılı değildir ve tetiklenme anında ise güç kaynağının besleme kablosu 3-faz prize takılmıştır. Test yapılan cihazda (İng, device under test) kullanılan 3-faz güç kaynağı (İng, power supply) ile osiloskobun aynı şebekeye bağlandığını gösteren basitleştirilmiş şema Şekil 3.3.13'te gösterilmiştir [131]. Bu şekilde izole olmayan sistemlerin toprak hatlarının birbirine bağlı olduğu anlatılmıştır.



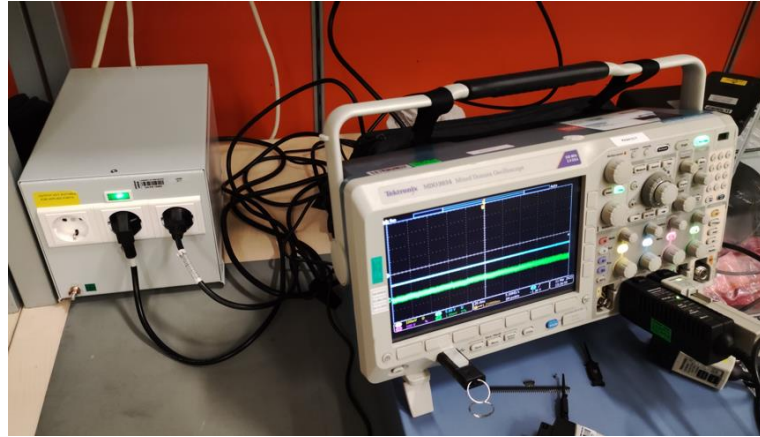
Şekil 3.3.12. Yüksek gerilim DC güç kaynağının osiloskop ölçümüne etkisi



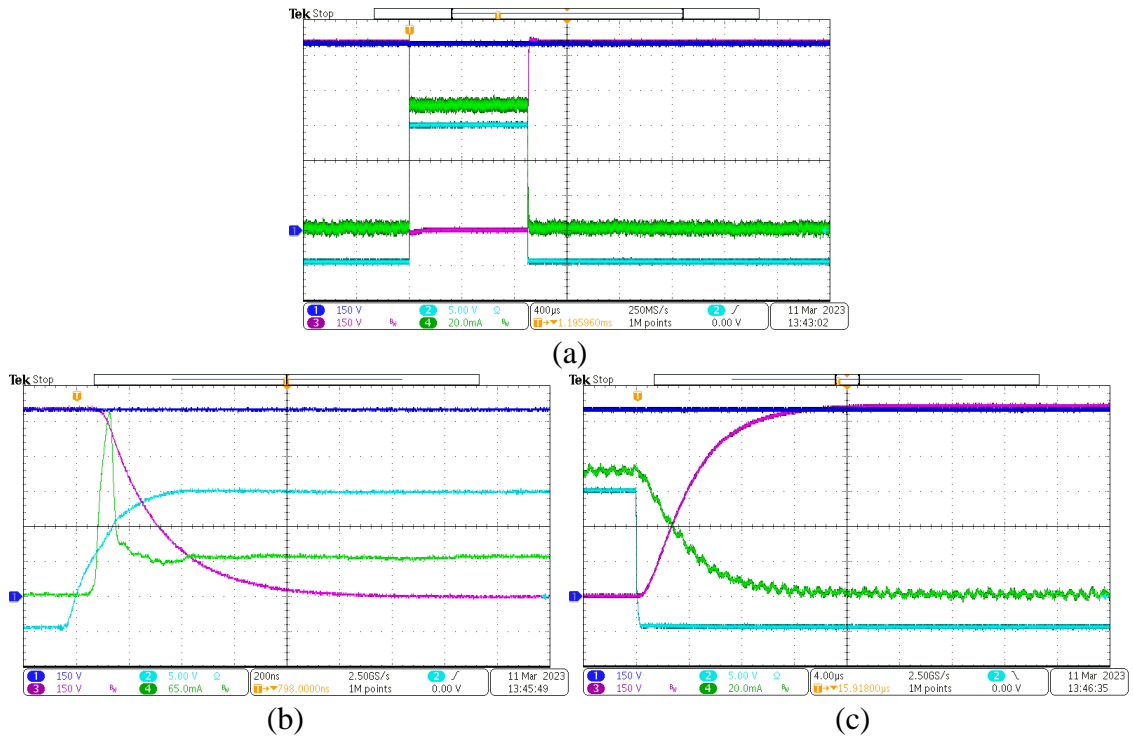
Şekil 3.3.13. İzole olmayan sistemlerin basitleştirilmiş gösterimi [131]

Osiloskop ölçümünün yüksek gerilim DC güç kaynağından etkilendiğini doğrulamak için ikinci bir ölçüm aleti olan taşınabilir (bataryalı) el tipi multimetre kullanılmıştır. Yüksek gerilim DC güç kaynağının besleme kablosu 3-faz prize takılı ve sökülü iken kapı-kaynak gerilimi multimetre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde kapı gerilimi üzerinde herhangi bir dalgalanma olmadığı gözlemlenmiştir. Osiloskop ile alınan ölçümdeki bu yanlış

okumanın ölçüm aletinin izole olmamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle osiloskop güç beslemesi izole trafo ile sağlanmıştır (bakınız Şekil 3.3.14) ve yüksek gerilim DC güç kaynağının besleme kablosu 3-faz prize takılmıştır. Aynı şekilde de gösterildiği gibi kapı geriliminde herhangi bir dalgalanma olmadığı ve sorunun çözüldüğü görülmüştür. Ardından sırasıyla 100V-800V gerilimleri ile anahtarlama testleri gerçekleştirilmiştir. 11k Ω dirençle 800V altında alınan ölçüm sonuçları Şekil 3.3.15'te verilmiştir. Şekil 3.3.15(a)'da alınan ölçümün uzaklaştırılmış görünümü, (b)'de anahtarın iletme giriş anı ve (c)'de iletimden çıkış anı yakından gösterilmiştir.

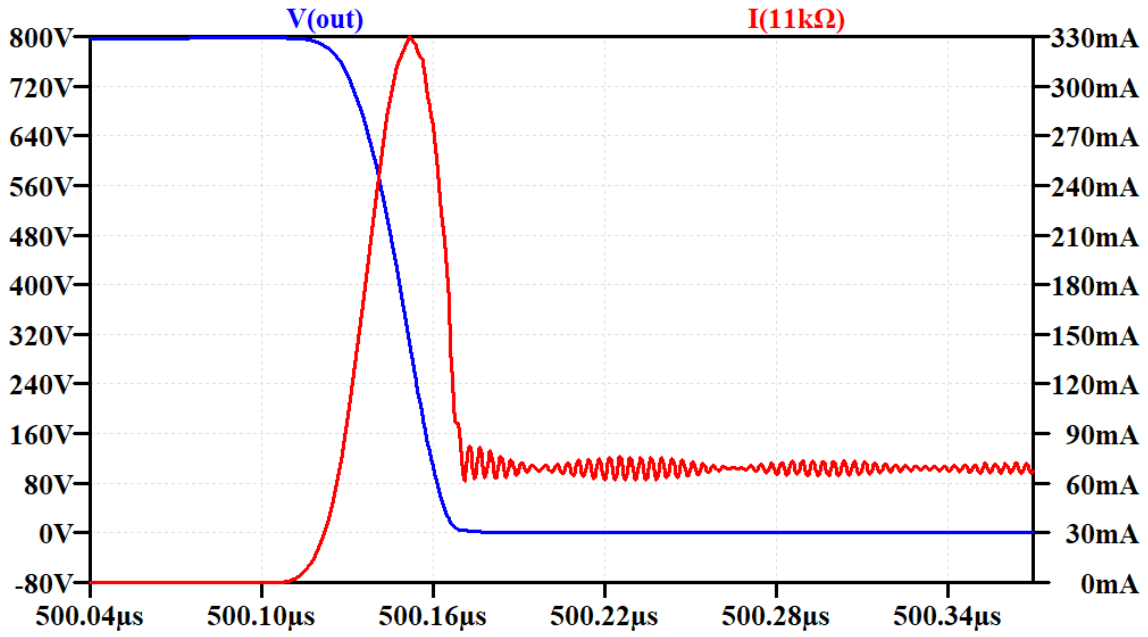


Şekil 3.3.14. Osiloskop güç beslemesinin izole trafodan sağlanması



Şekil 3.3.15. 800Vdc gerilim altından 11k Ω dirençle anahtarlama testi. (a)Uzaklaştırılmış görünüm. (b)İletime giriş anı. (c)İletimden çıkış anı.

Şekil 3.3.15(b)'de görüldüğü gibi anahtarın ilettime giriş anında 308mA tepe akımı görüp devamında da 66mA değerine oturmaktadır. Herhangi bir salınım oluşmadığı ve anlık akım çektiği için üretilen modül ile ilgili olduğu düşünülmemektedir. Bu akım karakteristiği kapasitif yük [132] nedeniyle oluşabileceği için yük olarak kullanılan direnç değeri LCR metre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde 11 k Ω test direncinin 100 kHz'de 10.65 pF'lık paralel parazitik kapasitans (C_p) değeri olduğu görülmüştür. Ardından daha önceden oluşturulan LTspice model içerisine direnç değeri "11.598 k Ω || 10.65 pF" olarak dirence paralel kapasitans eklenmiştir. Simülasyon sonucu Şekil 3.3.16'da verilmiştir.



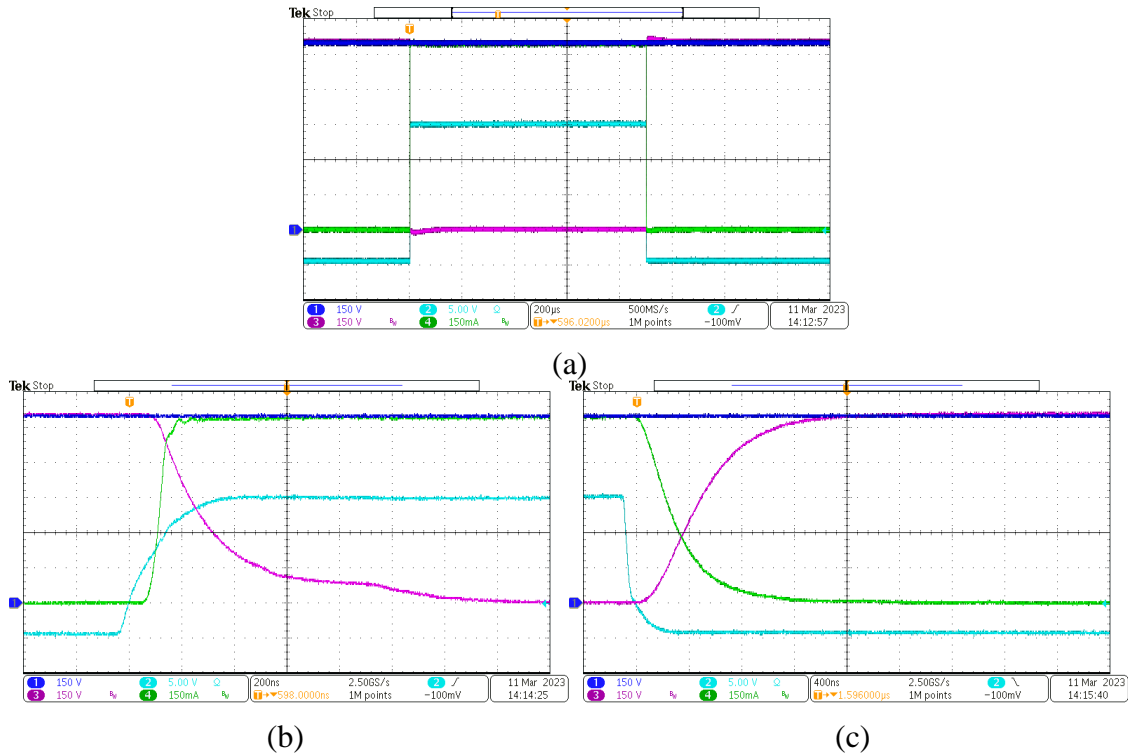
Şekil 3.3.16. Test direnci simülasyon sonucu

11k Ω direncin Şekil 3.3.15(a)'da verilen ölçüm ile Şekil 3.3.16'da verilen simülasyon sonucu benzerlik göstermektedir. Bahsedilen şekillere bakıldığında her iki şekilde de anahtarın ilettime girme anında direncin paralel kapasitansını doldurmak için anlık çektiği tepe akımı neredeyse aynıdır.

Kullanılan direncin parazitik kapasitans değeri yüksek olduğu için ilk anahtarlama anında yüksek akım çekmekteydi. Bu da anahtarın karakterizasyonun elde edilmesine engel olmaktaydı. Bu nedenle parazitik kapasitans değeri düşük bir direnç ile testler tekrarlanmıştır. Yeni kullanılan 1k Ω direncin elektriksel değeri LCR metre ile ölçülmüştür. Ölçülen direncin C_p değeri negatif değerlikli olduğu için direncin kapasitif değil endüktif davranışının baskın olduğunu göstermektedir. Simülasyon üzerinde de bu

direnç değeriyle tekrarlanmıştır ve anahtarlama anında yüksek akım çekmediği görölmüştür.

Test düzeneğindeki direnç yükü $1k\Omega$ ile değiştirilerek testler tekrarlanmıştır. DC bara gerilimi 100V aralıklarla arttırılıp ölçümler alınmıştır. $1k\Omega$ dirençle 800V altında alınan ölçüm sonuçları Şekil 3.3.17’de verilmiştir. Şekil 3.3.17(a)’da alınan ölçümün uzaklaştırılmış görünümü, (b)’de anahtarın ilettime giriş anı ve (c)’de iletimden çıkış anı yakından gösterilmiştir.



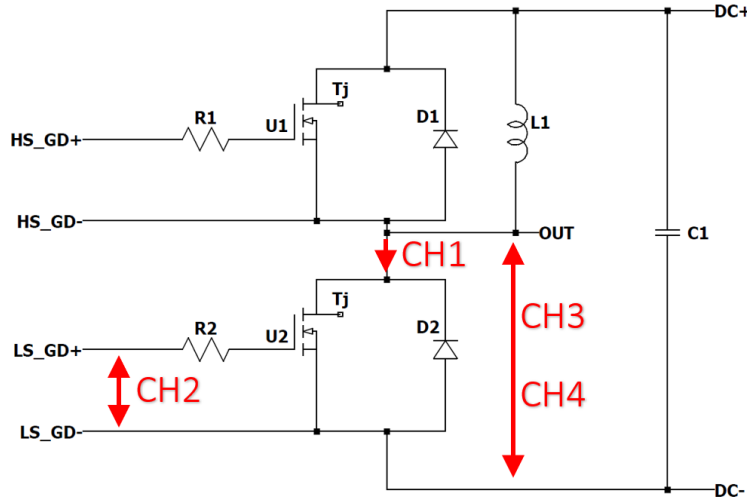
Şekil 3.3.17. 800Vdc gerilim altından $1k\Omega$ dirençle anahtarlama testi. (a)Uzaklaştırılmış Görünüm. (b)İletime giriş anı. (c)İletimden çıkış anı.

Şekil 3.3.17’de de göröldüğü gibi I_D akımı 800mA değerine ulaşmıştır ve herhangi bir tepe akımı oluşmamıştır. Yapılan bu çalışma ile DPT testleri öncesinde yazılım doğrulama çalışmaları tamamlanmıştır. Ayrıca nanosaniye mertebesindeki anahtarlama ile anahtarın yanlış açılmadığı, üretilen alt modülden veya test devresinden kaynaklı gerilim veya akımda salınımların oluşmadığı da doğrulanmıştır.

3.3.4. Yüksek Gerilim Ölçüm Aletinin Etkisi

Bobin ile yükleme testlerine geçmeden önce kullanılan ölçüm aletlerinin ölçüm sonuçlarına etkisinden bahsedilmiştir. Ölçümler sırasında karşılaşılan farklı ölçüm

aletlerinin farklı sonuçlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar da anahtarlama süresi ve anahtarlama kayıplarını doğrudan etkilediği için daha doğru ölçümlerin alınması önem arz etmektedir. Ölçüm aletleri Şekil 3.3.18’de gösterildiği gibi bağlanmıştır.

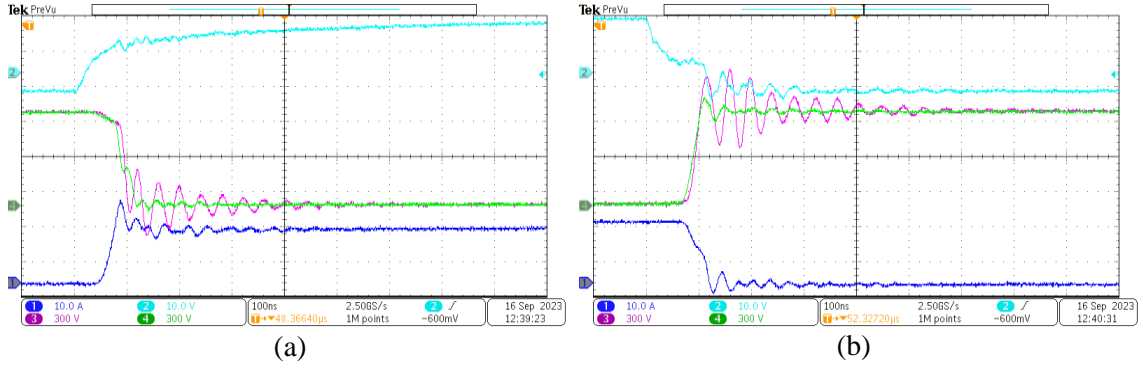


Şekil 3.3.18. Ölçüm aleti bağlantıları

Kullanılan ölçüm aletleri aşağıda verilmiştir.

- CH1: PEM, CWTMini HF03R, 60A_t Rogowski Akım Probu
- CH2: Tektronix, THDP0200, 150V_t Gerilim Probu
- CH3: Tektronix, P5210A, 5600V_t Gerilim Probu (50MHz)
- CH4: Tektronix, THDP0200, 1500V_t Gerilim Probu (200MHz)

Yüksek akım ve yüksek gerilim altındaki anahtarlama anında gerilim dalgalanması daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle anahtarlama anında oluşan gerilim dalgalanması incelenmiştir. İki farklı seviyedeki gerilim probu aynı hatta bağlanmıştır. Ardından anahtarlama anında oluşan gerilim farkı Şekil 3.3.19’da verilmiştir. Şekil 3.3.19(a)’da iletme giriş anındaki, (b)’de ise iletimden çıkış anındaki gerilim değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3.19. Farklı gerilim probu ile alınan ölçümlerin karşılaştırılması. (a) İletime giriş anı. (b) İletimden çıkış anı.

Şekil 3.3.19(a)'da gösterilen iletime giriş anında CH3 kanalındaki gerilim salınımı $564V_{tt}$, CH4 kanalındaki gerilim salınımı ise $96V_{tt}$; Şekil 3.3.19(b)'de iletimden çıkma ise CH3 kanalındaki gerilim salınımı $672V_{tt}$, CH4 kanalındaki gerilim salınımı ise $204V_{tt}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca iletimden çıkma anında oluşan tepe gerilimleri ise CH3 için $1164V$, CH4 için $924V$ olarak ölçülmüştür.

Gerilim dalgalanmasının oluşmasının nedeni anahtarlama elemanı ve test devresinden kaynaklanan parazitik endüktanstır. Parazitik endüktans üzerinde oluşan akım değişimi ile oluşan gerilim değişim formülü aşağıda verilmiştir.

$$\bullet \quad V = L \times \frac{di}{dt} \quad \rightarrow \quad L = V \times \frac{dt}{di} \quad (45)$$

Parazitik endüktans değeri bilinmediği ve hassas şekilde ölçülebilecek ölçüm aletimizin bulunmaması nedeniyle matematiksel hesaplama ile parazitik endüktans değeri hesaplanmıştır. İki farklı ölçüm aletinden alınan gerilim ölçümleri, akım değişimi ve süresi ile iki farklı endüktans değeri hesaplanmıştır. CH3 gerilim probu ölçümünden elde edilen parazitik endüktans değeri L_{CH3} , CH4 gerilim probu ölçümünden elde edilen parazitik endüktans ise L_{CH4} ile gösterilmiştir.

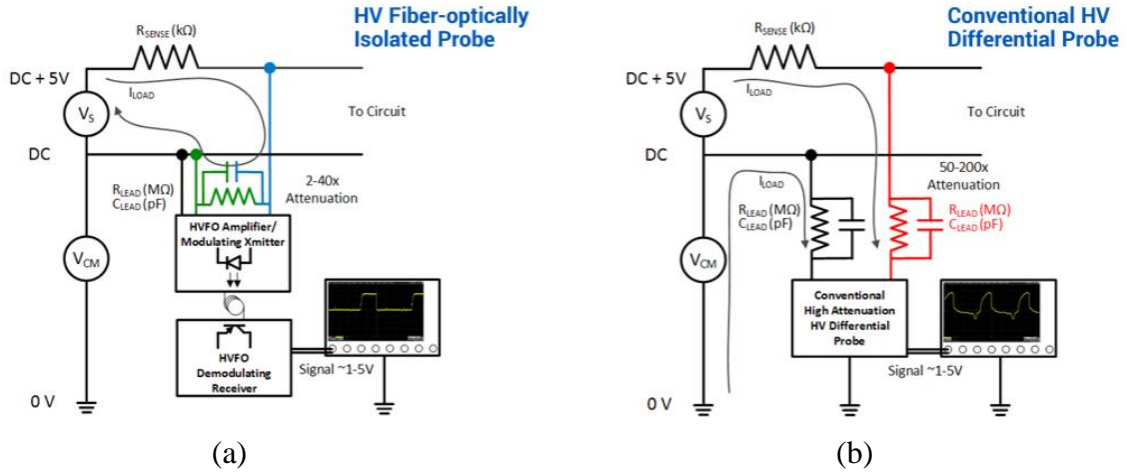
$$\bullet \quad L_{CH3} = V \times \frac{dt}{di} = 672V \times \frac{47.3ns}{16.8A} = 1.89 \mu H \quad (46)$$

$$\bullet \quad L_{CH4} = V \times \frac{dt}{di} = 204V \times \frac{47.3ns}{16.8A} = 0.57 \mu H \quad (47)$$

CH3 kanalında ölçülen gerilim dalgalanmasının oluşabilmesi için parazitik endüktansın $1.89\mu H$, CH4 kanalındaki ölçüme göre ise $0.57\mu H$ olması gerekmektedir. 1200V modül paket yapısındaki ticari SiC MOSFET anahtarların parazitik endüktans değerleri $4.9nH$ -

21nH aralığında olduğundan “3.1.2. Test Devresi Tasarımı, Analizi ve Üretimi” başlığında bahsedilmiştir. Hesaplanan $1.89\mu\text{H}$ değeri benzer ürünlere göre çok yüksek olduğu için doğru olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca ölçümlere göre 3 ve 4 numaralı kanallara bağlanan 5600V ve 1500V ölçüm aletlerinin sağladığı ölçümlerde oluşan tepe gerilimi sırasıyla 1164V ve 924V’tur. Aynı hat üzerinden alınan bu ölçümde 240V’luk fark bulunmaktadır. Son olarak 5600V’luk ölçüm aleti 50MHz, 1500V’luk ölçüm aleti ise 200MHz’lik bant genişliğine (İng, bandwidth) sahiptir. SiC MOSFET alt modülün anahtarlama süresi de nanosaniye mertebelerinde olduğu için 5600V’luk ölçüm aletinde ciddi salınımlara neden olduğu ve yanlış ölçümlerin elde edildiği düşünülmektedir. Bu nedenle V_{ds} ölçümlerinde P5210A (5600V_t) gerilim probu yerine THDP0200 (1500V_t) gerilim probu tercih edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen 5600V ve 1500V ölçüm aletleri optik olarak izole olmayan geleneksel yüksek gerilim diferansiyel ölçüm aletlerine (İng, conventional HV differential probe) örnektir. Yüksek gerilim fiber optikli izole ölçüm aletleri (İng, HV fiber-optically isolated probe), yüksek gerilim ölçüm hattı ile osiloskoba gönderilen veri arasındaki izolasyonu fiber optik dönüştürücülerle sağladığı için fiziksel olarak bir bağlantısı bulunmamaktadır. Aralarındaki izolasyon optik olarak sağlandığı ve toprak hattına akan ortak mod gürültüsü (İng, common mode noise) çok daha düşük olacağı için de daha yüksek ortak mod zayıflatma oranına (İng, common mode rejection ratio) sahiptir. Bahsedilen bu etki Şekil 3.3.20’de gösterilmiştir [133]. Şekil 3.3.20(a) görselinde fiber optikli izole ölçüm aletinin, Şekil 3.3.20(b)’de ise geleneksel diferansiyel ölçüm aletinin devre şeması göstermektedir. (a)’da gösterilen ölçüm noktalarından toprak hattına herhangi bir akımın akmadığı ve ölçüm aletinin eşdeğer devresindeki RC devre üzerinden yolunu tamamladığı gözükmektedir. (b)’de ise optik olarak izole olmadığı için ölçüm noktalarından geleneksel ölçüm aletine doğru akım aktığı gösterilmiştir. Ayrıca ölçülen sinyallerdeki zayıflama (İng, attenuation) fiber optikli izole ölçüm aletleri için 2-40 kat aralığındayken geleneksel diferansiyel ölçüm aletleri için 50-200 kat aralığında olduğu verilmiştir [133].



Şekil 3.3.20. Farklı türdeki ölçüm aletlerinin eşdeğer devresi ve akım yolları. (a)Yüksek gerilim fiber optikli izole ölçüm aleti. (b)Geleneksel yüksek gerilim diferansiyel ölçüm aleti [133].

Şekil 3.3.20(b)'de gösterilen akımın geçtiği bu hatların da eşdeğerine karşılık gelen RC devresi olduğu için ölçümlerde salınımların oluşmasına da neden olabilmektedir. Şekil 3.3.19'da gösterilen farklı ölçüm aletlerinde oluşan gerilim dalgalanmalarının RC eşdeğer devresinden kaynaklanabileceğini de göstermektedir.

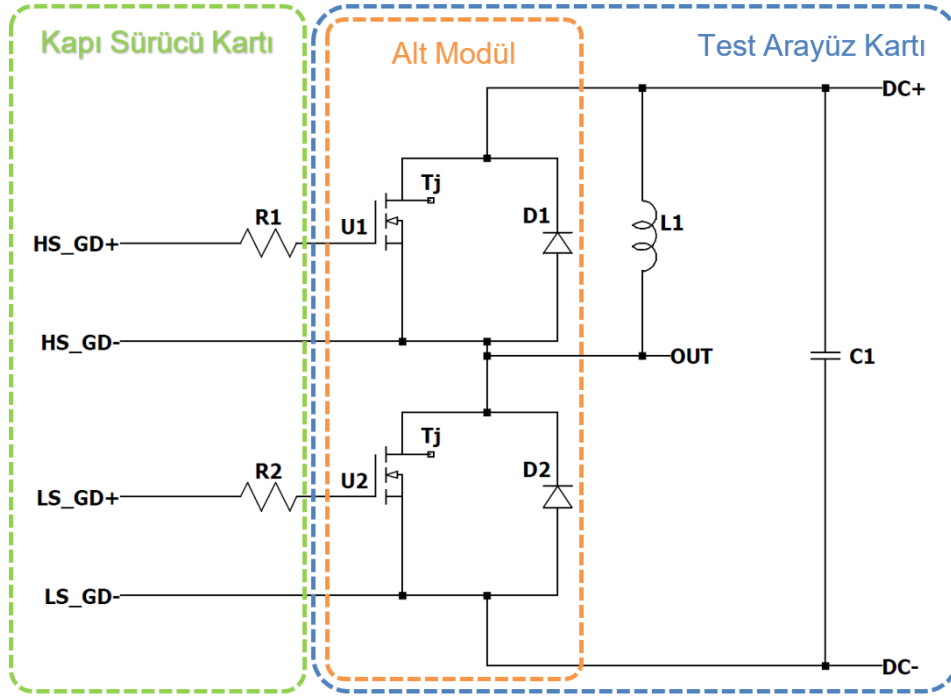
SiC ve GaN tabanlı anahtarlar Si anahtarlara göre daha yüksek anahtarlama frekansına sahip olduğu için ölçüm aletinin yüksek bant aralığında olması ve yüksek gerilim hattı ile osiloskop arasındaki izolasyonun yüksek olması önemlidir [134]. Fiber optikli izole ölçüm aletleri yüksek gerilim ve yüksek frekans anahtarlama sistemlerdeki ölçümler için önerilmektedir [135, 136]. Gelecek çalışmalarda geleneksel yüksek gerilim diferansiyel ölçüm aleti yerine fiber optikli izole ölçüm aleti ile daha hassas ve doğru sonuçlar elde edilebilir.

3.4. Yüksek Gerilim Test Çalışmaları-2

3.4.1. Bobin Yüğü ile Anahtarlama Testleri

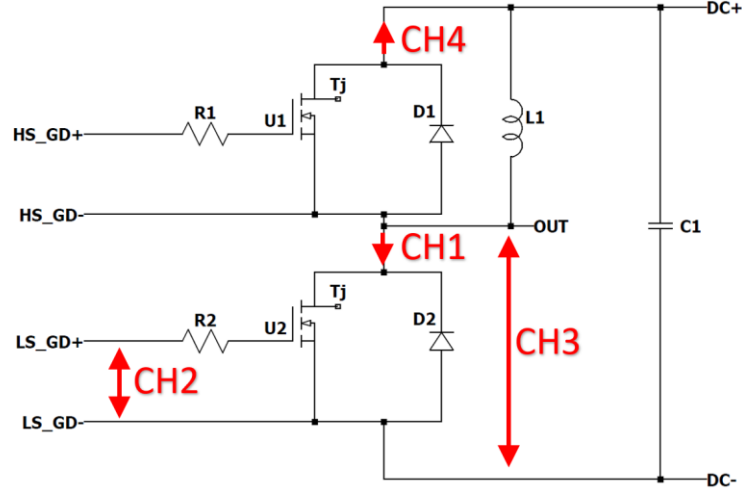
Bu başlıkta bobin yüğü ile çift darbe testi gerçekleştirilerek anahtarlama süresi ile anahtarlama kayıpları hesaplanmıştır ve üretilen alt modülün veri sayfasına karşılık gelen grafikler hazırlanmıştır. Ardından üretilen alt modülden alınan ölçümlerle "CPM3-1200-0075A" yongasının kullanıldığı "C3M0075120J" ayırık anahtarın veri sayfasındaki veriler [103] karşılaştırılmıştır.

Bu kısma kadar yapılan testlerde tek darbe gerilim uygulanmıştı. Yazılımda tek darbe gerilimi yerine çift darbe gerilimi oluşturulmuştur. Oluşturulan darbe gerilim süresi CAN üzerinden ayarlanabilir yapılmıştır. Kullanılan bobin değerine göre test edilecek akıma ulaşmak için iletimde olması gereken süre hesaplanıp anahtarlama karakteristiği incelenecektir. Şekil 3.4.1’de kapı sürücü kartı, alt modül, test arayüz kartı ve bobinin basitleştirilmiş devre şeması verilmiştir.



Şekil 3.4.1. Çift darbe test devre şeması

Test yapılan cihaz, alt modül içerisindeki U2&D2 anahtar olup anahtarın akım ve gerilim ölçümleri alınmıştır. Ayrıca alt modül içerisindeki D1 serbest tekerlek diyotu (İng, freewheel diode) L1 bobinine paralel bağlanmıştır. Bu sayede çift darbe testi sırasında U2 anahtarının iletimde olmadığı zaman aralığında bobin içerisinde depolanan enerji D1 diyotu üzerinden akım olarak akmaya devam edecektir. Test boyunca D1 diyotu üzerinden geçen akım da ölçülmüştür. Ölçüm aleti bağlantı noktaları Şekil 3.4.2’de verilmiştir. Bu şekilde de gösterildiği gibi CH1 kanalından U2&D2 anahtarından geçen akım, CH2 kanalından U2 anahtarının kapı-kaynak gerilimi, CH3 kanalından U2 anahtarının akaç-kaynak gerilimi ve CH4 kanalından da D1 diyotu üzerinden geçen akım ölçülmüştür.



Şekil 3.4.2. Çift darbe testi ölçüm noktaları

Kullanılan ölçüm aletleri aşağıda verilmiştir.

- CH1: PEM, CWTMMini HF03R, 60A_t Rogowski Akım Probu
- CH2: Tektronix, THDP0200, 150V_t Gerilim Probu
- CH3: Tektronix, THDP0200, 1500V_t Gerilim Probu
- CH4: Tektronix, TCP0020, 20A_{rms} Akım Probu

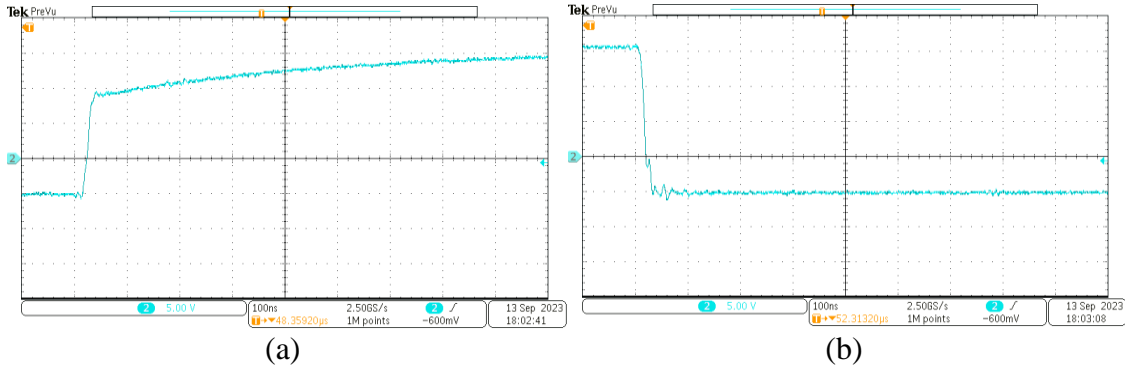
Farklı kapı dirençleri ile 600V ve 800V DC bara gerilimlerinde akım değeri kademeli olarak arttırılarak anahtarlama testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarının benzer hassasiyette karşılaştırılması adına ölçüm aletleri değiştirilmeyecek olup tüm kanalların ölçeklendirmesi olabildiğince aynı yapılmıştır. Örneğin 20 Ω için alınan ölçümler sırasında osiloskoptaki CH1 kanalının akım kademesi kare başına 5A ise 5 Ω için alınan ölçümde de kare başına 5A olmasına özen gösterilmiştir. Benzer durum CH2 ve diğer kanallarla alınan ölçümlerde de geçerlidir.

Belirtilen ayırık anahtarın veri sayfası incelendiğinde kapı direncinin azami değeri 20 Ω verilmiştir. Daha yüksek değerlikli kapı direncinin kullanılması durumunda anahtarlama süresinin uzayacağı, anahtarlama kaybının artacağı [137] ve referans anahtarda da karşılaştırılacak veri olmadığı için en fazla 20 Ω kapı direnciyle testler gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle çalışmamızda 5 Ω , 10 Ω , 15 Ω ve 20 Ω kapı dirençleri kullanılmıştır. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek için her direncin ölçümü hassas bir şekilde RLC metre ile ölçülüp en yakın değerlikte olanlar kullanılmıştır. İletime giriş ve iletimden çıkış dirençleri için alınan ölçüm sonuçları Çizelge 3.4.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.4.1. İletime giriş ve iletimden çıkış dirençlerinin ölçüm sonuçları

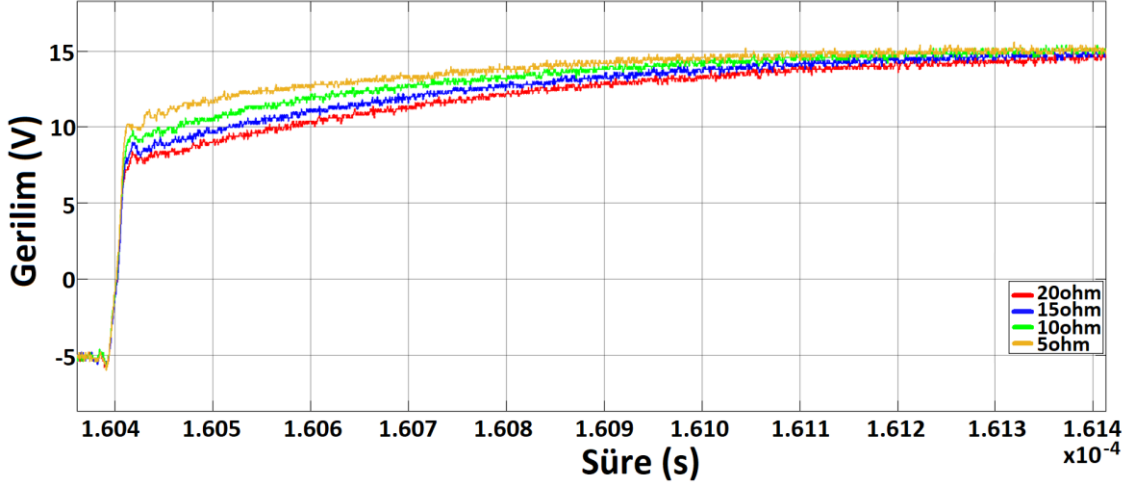
5 Ω Direnç Ölçümleri	
İletime Giriş Direnci	4.994 Ω
İletimden Çıkış Direnci	4.986 Ω
10 Ω Direnç Ölçümleri	
İletime Giriş Direnci	9.961 Ω
İletimden Çıkış Direnci	10.031 Ω
15 Ω Direnç Ölçümleri	
İletime Giriş Direnci	14.949 Ω
İletimden Çıkış Direnci	14.974 Ω
20 Ω Direnç Ölçümleri	
İletime Giriş Direnci	19.947 Ω
İletimden Çıkış Direnci	19.981 Ω

İlk olarak kapı sürücü kartının çıkış gerilimleri değiştirildiği için kapı sürücü kartının test kartına montajı yapılmadan yalnızca kapı sürücü kartının anahtarlama süreleri incelenmiştir. Kapı sürücü kartı, test kartına takılmadan ölçüm alındığı için sürme dirençlerinin yalnızca kart üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. İletime girme ve iletimden çıkma dirençleri sırasıyla 20 Ω, 15 Ω, 10 Ω ve 5 Ω ile değiştirilerek kapı sürücüyü anahtarlama sinyali uygulanıp kapı sürücünün kapı-kaynak çıkış gerilimi incelenmiştir. Yapılan bu ölçümle yalnızca kapı sürücü kartının kapı direncine bağlı olarak iletme girme ve iletimden çıkma süreleri karşılaştırılmıştır. Kapı direncinin 20Ω olduğu koşulda alınan V_{gs} çıkış gerilimi Şekil 3.4.3'te verilmiştir.

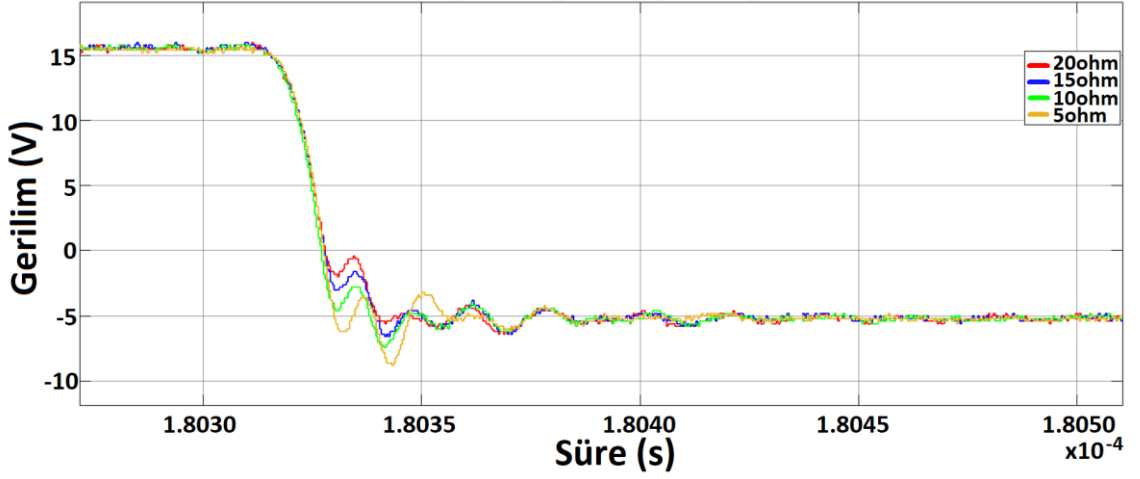


Şekil 3.4.3. Kapı direnci 20Ω iken kapı sürücünün çıkış gerilimi. (a) İletime girme anı.
(b) İletimden çıkma anı.

Benzer ölçüm 15Ω, 10Ω ve 5Ω kapı dirençleri için tekrarlanmıştır. Alınan ölçümler “.csv” formatında kaydedilip MATLAB/Simulink kullanılarak üst üste çizdirilmiştir. Çizim sonuçlarında elde edilen iletme girme ve iletimden çıkma grafikleri sırasıyla Şekil 3.4.4 ve Şekil 3.4.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4.4. Farklı kapı dirençlerinin kapı sürücü ilettime giriş süresine etkisi

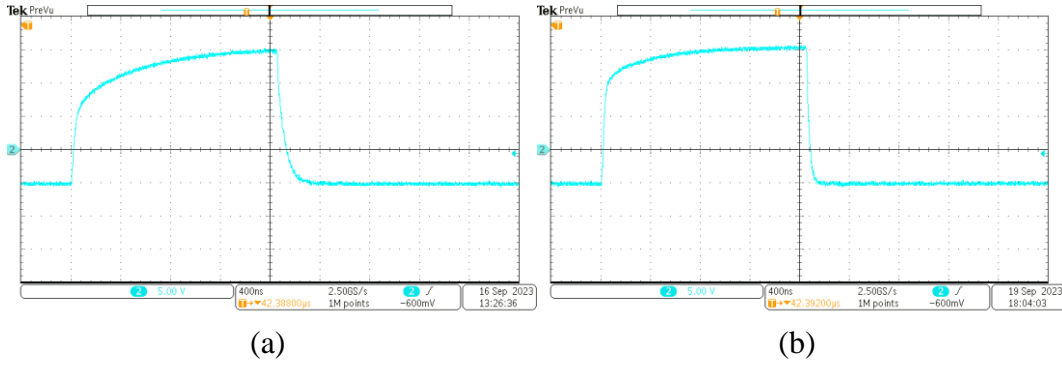


Şekil 3.4.5. Farklı kapı dirençlerinin kapı sürücü iletimden çıkış süresine etkisi

Şekil 3.4.4'te gösterildiği gibi ilettime giriş anında şarj edecek SiC MOSFET'in C_{gs} kapasitansı olmadığı için kapı-kaynak gerilimindeki yükseliş süresi benzerdir, fakat 15V'a ulaşma süresi direnç değeri arttıkça artmaktadır. İletimden çıkış anında da düşüş süresi benzer olup -5V'a ulaşma süresi direnç değeri arttıkça artmaktadır (bakınız Şekil 3.4.5). Fakat direnç değeri düştükçe kapı sürücü kartındaki ilgili devreler daha hızlı kapandığı için gerilimin ulaştığı negatif tepe değeri artmaktadır. Şekil 3.4.4 ve Şekil 3.4.5'te verilen ilettime giriş ve iletimden çıkış sürelerinin benzer olma nedeni ise kapı sürücü çıkışının SiC MOSFET'e bağlanmadığı için şarj edilecek SiC MOSFET'in C_{gs} kapasitansının olmamasıdır.

Kapı sürücünün farklı sürme dirençlerindeki etkisi incelendikten sonra kapı sürücü kartı test kartına takılmıştır. Dolayısıyla alt modül içerisindeki SiC MOSFET anahtarlama

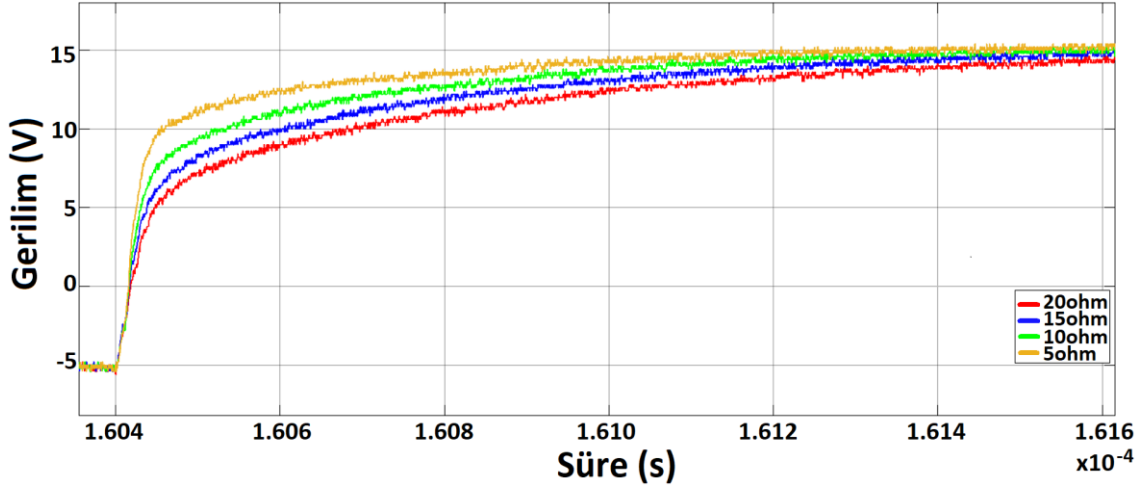
testleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle DC bara gerilimi uygulamadan önce farklı sürme dirençlerinin anahtarlama süresi karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile alt modül içerisindeki SiC MOSFET'in C_{gs} kapasitansı doldurulup boşaltılacağı için sürme direncinin etkisi, bir önceki çalışmaya göre daha belirgin olmuştur. DC bara gerilimi 0V iken anahtarlama gerçeştirildiği için yalnızca V_{gs} kapı gerilimleri incelenmiştir. Farklı kapı direnci ile ölçülen V_{gs} gerilimleri Şekil 3.4.6'da verilmiştir. Şekil 3.4.6(a)'da kapı direnci (R_g) 20 Ω , Şekil 3.4.6(b)'de ise kapı direnci 5 Ω değerindeyken SiC MOSFET'in iletme giriş ve iletimden çıkışını göstermektedir.



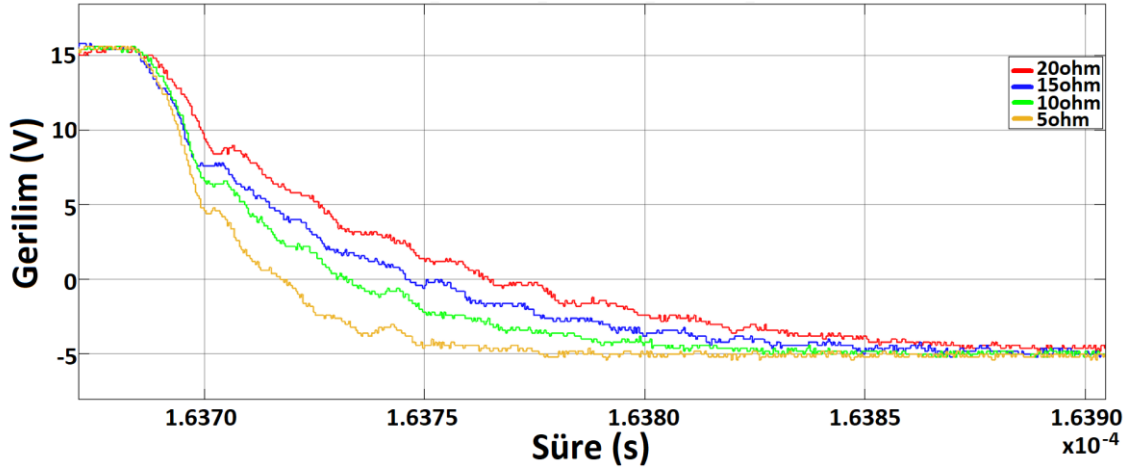
Şekil 3.4.6. DC bara gerilimi 0V iken SiC MOSFET'in kapı-kaynak gerilimi.

(a) $R_g=20\Omega$. (b) $R_g=5\Omega$.

Aynı ölçümler 15 Ω ve 10 Ω kapı dirençleri için tekrarlanmıştır. Benzer şekilde osiloskop görüntüleri “.csv” formatında kaydedilip MATLAB/Simulink kullanılarak üst üste çizdirilmiştir. SiC MOSFET'in iletme giriş ve iletimden çıkış sürelerinin kapı direncine göre karşılaştırılmasında kullanılan grafikler sırasıyla Şekil 3.4.7 ve Şekil 3.4.8'de verilmiştir.



Şekil 3.4.7. DC bara gerilimi 0V iken farklı kapı dirençlerinin SiC MOSFET'in ilettime giriş süresine etkisi



Şekil 3.4.8. DC bara gerilimi 0V iken farklı kapı dirençlerinin SiC MOSFET'in iletimden çıkış süresine etkisi

Şekil 3.4.7'de görüldüğü gibi ilettime giriş anında yükseliş süresi direnç değeri arttıkça artmaktadır. İletimden çıkış anında da beklendiği gibi düşüş süresi direnç değeri arttıkça artmaktadır (bakınız Şekil 3.4.8). Kapı sürücü kartı SiC MOSFET'e bağlanmadan önce görülen gerilim dalgalanmaları modüle takıldıktan sonra anahtarın C_{gs} kapasitansını şarj/deşarj yaptığı için herhangi bir gerilim dalgalanması görülmemiştir.

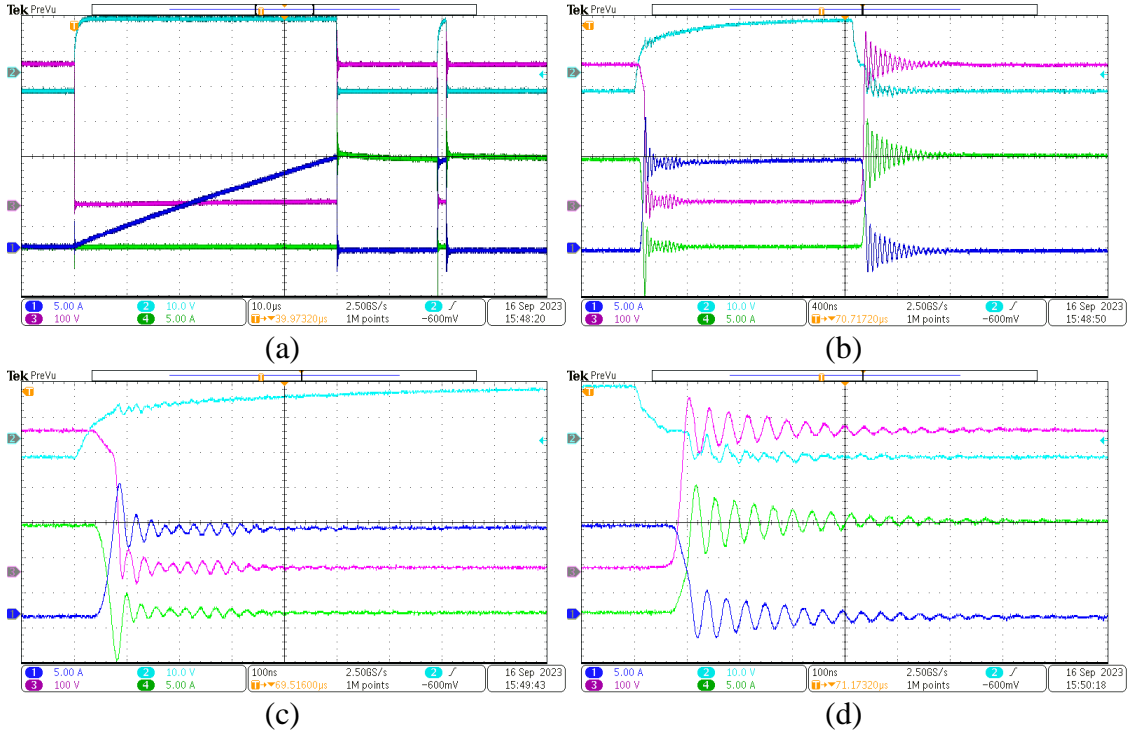
DC bara gerilimi 0V altında gerçekleştirilen anahtarlama testinden sonra yüksek gerilim testlerine geçilmiştir. Referans alınan "C3M0075120J" ayrık anahtarın azami akaç-kaynak gerilimi 1200V iken anahtarlama süreleri ve anahtarlama kayıpları 800V bara gerilimi altında gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde ticari 1200V yarım köprü SiC MOSFET modül için paylaşılan uygulama notlarında ve literatürdeki benzer çalışmalarda

gerçekleştirilen testlerin 600V veya 800V DC bara gerilimi altında yapıldığı görülmüştür [138–141]. Azami akaç-kaynak gerilimi yerine 600V veya 800V altında testlerin yapılmasının nedeni yüksek hızdaki gerilim değişimi sırasında (örneğin 50kV/ μ s) SiC MOSFET modülün parazitik endüktansı nedeniyle oluşabilecek gerilim aşımıdır [142]. Eğer belirtilen güvenlik payı bırakılmazsa parazitik endüktans sonucu oluşan gerilim aşımı SiC MOSFET modülün azami akaç-kaynak gerilimini geçmesine ve modülün zarar görmesiyle sonuçlanabilir. Benzer şekilde tez kapsamında da azami DC bara gerilimi 800V belirlenmiştir.

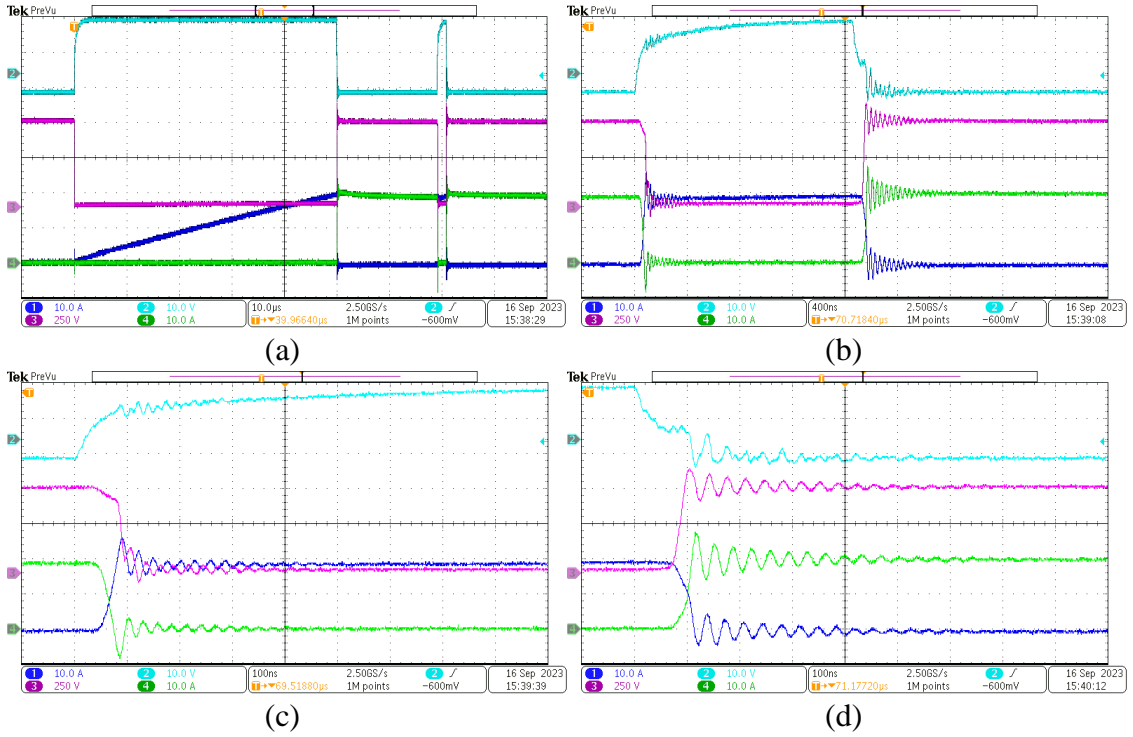
DC bara gerilim altındaki SiC MOSFET anahtarlama testleri kapı direnci değiştirilerek önceki testlerdeki gibi tekrarlanmıştır. Test edilecek DC bara gerilimleri ve ilgili bara geriliminde ölçüm alınan I_D akımı aşağıda verilmiştir.

- 400V DC Bara Gerilimi : 5A, 10A ve 13A I_D akımı
- 600V DC Bara Gerilimi : 5A, 12A 16A ve 20A I_D akımı
- 800V DC Bara Gerilimi : 5A, 11A, 16A ve 20A I_D akımı

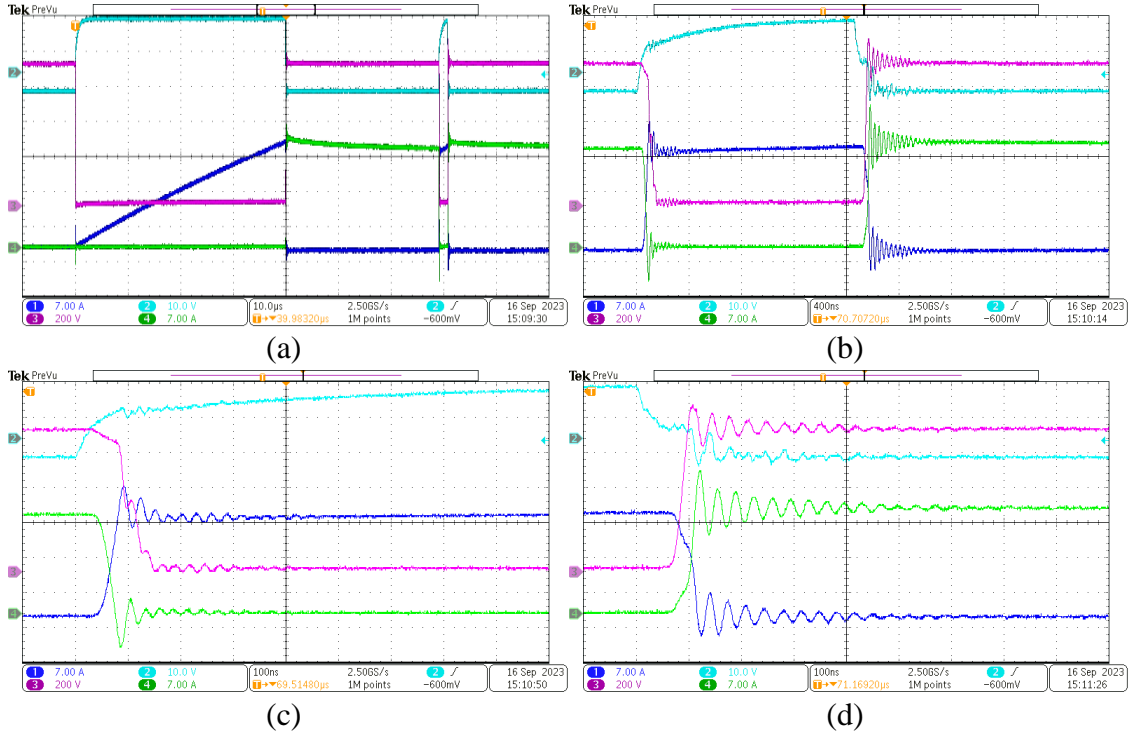
Çift darbe testi sırasında alınan uzaklaştırılmış görsel, ikinci darbenin görseli, yükselen ve düşen kenarlardaki görselleri osiloskop ortamında elde edilmiştir. Kapı direncinin 20 Ω olduğu koşulda 400V (13A), 600V (20A) ve 800V (20A) DC bara gerilim (ve akım) değerlerinde alınan ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 3.4.9, Şekil 3.4.10 ve Şekil 3.4.11’de verilmiştir. Belirtilen Şekil 3.4.9-11’deki osiloskop ölçümlerinin birim kare başına düşen süre değeri (a) birinci ve ikinci darbe için 10 μ s, (b) ikinci darbenin yakından görüntüsü için 400ns, (c) iletme giriş ve (d) iletimden çıkış ölçümleri içinse 100ns’dir. Birim kare başına düşen akım ve gerilim Şekil 3.4.9’da alınan osiloskop görüntüleri için “CH1 ve CH4: 5A/birim kare”, “CH2: 10V/birim kare”, “CH3: 100V/birim kare”; Şekil 3.4.10’da alınan osiloskop görüntüleri için “CH1 ve CH4: 10A/birim kare”, “CH2: 10V/birim kare”, “CH3: 250V/birim kare”; Şekil 3.4.11’de alınan osiloskop görüntüleri için “CH1 ve CH4: 7A/birim kare”, “CH2: 10V/birim kare”, “CH3: 200V/birim kare” değerlerindedir.



Şekil 3.4.9. Kapı direnci 20Ω iken $400\text{V}/13\text{A}$ değerinde anahtarlama testi. (a) Birinci ve ikinci darbe görseli. (b) İkinci darbenin yakından görünümü. (c) İletime giriş anı. (d) İletimden çıkış anı.



Şekil 3.4.10. Kapı direnci 20Ω iken $600\text{V}/20\text{A}$ değerinde anahtarlama testi. (a) Birinci ve ikinci darbe görseli. (b) İkinci darbenin yakından görünümü. (c) İletime giriş anı. (d) İletimden çıkış anı.

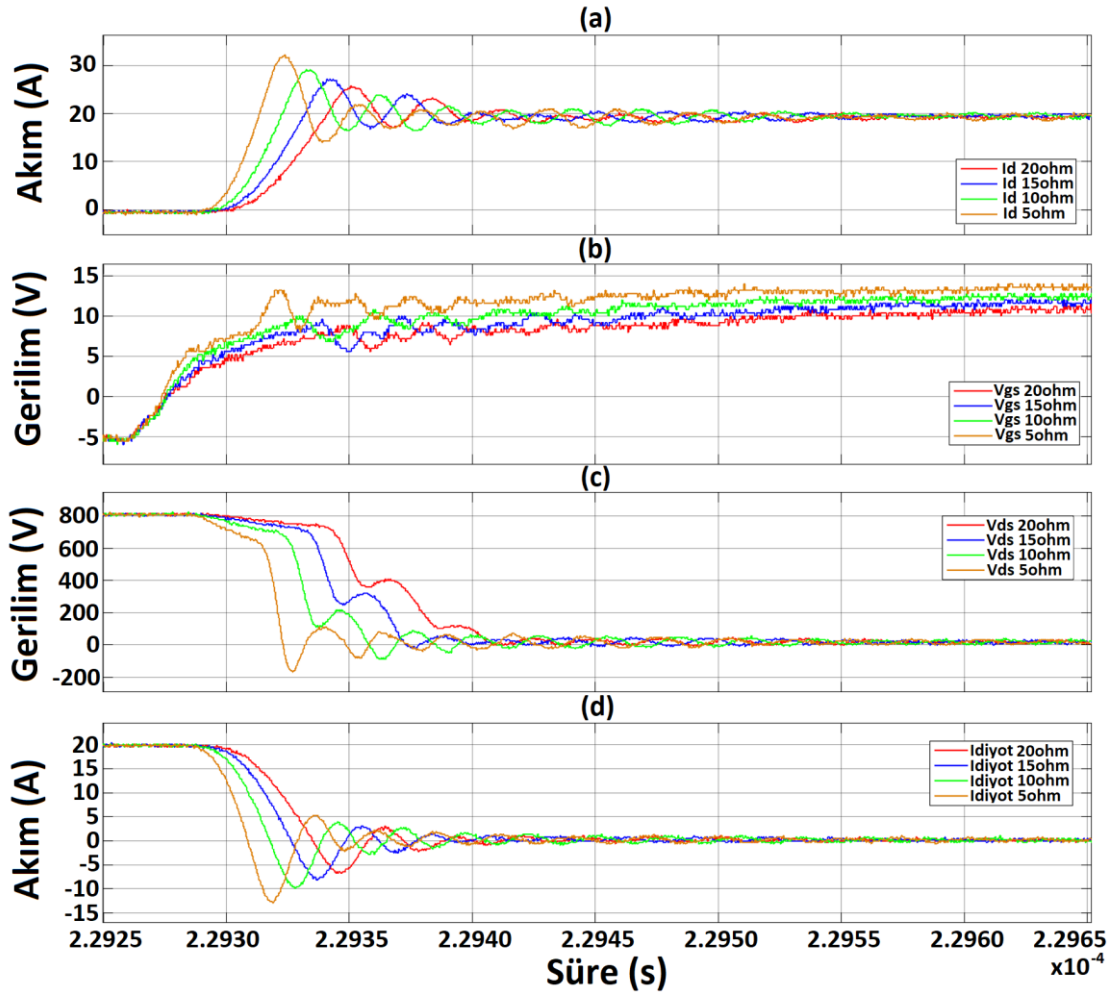


Şekil 3.4.11. Kapı direnci 20Ω iken $800V/20A$ değerinde anahtarlama testi. (a) Birinci ve ikinci darbe görseli. (b) İkinci darbenin yakından görünümü. (c) İletime giriş anı. (d) İletimden çıkış anı.

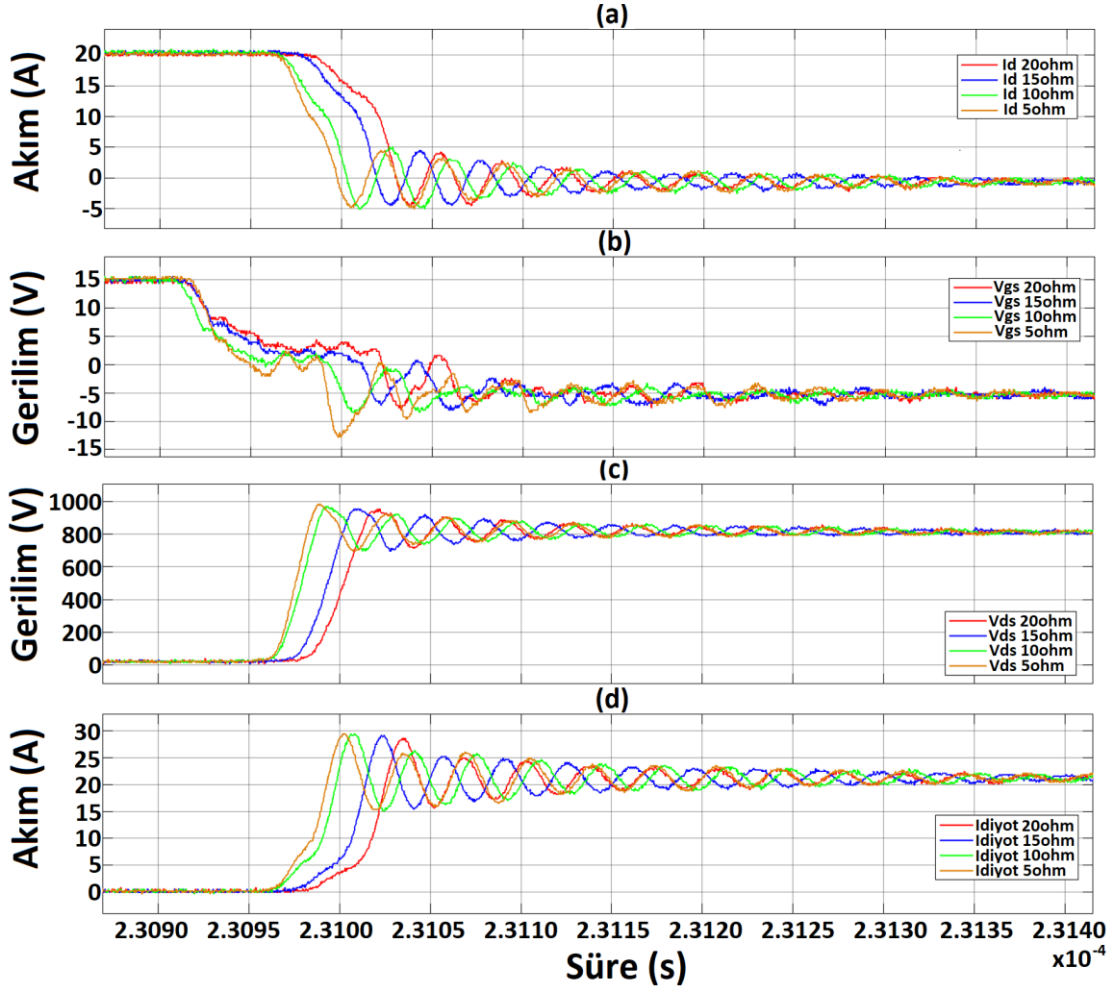
Kapı direncinin 20Ω olduğu koşulda alınan ölçümlerin benzeri, kapı direnci sırasıyla 15Ω , 10Ω ve 5Ω ile değiştirilip testler tekrarlanmıştır. Alınan tüm osiloskop ölçümleri “.csv” formatında kaydedilip MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. “3.3.5. Alt Modül Anahtarlama Sürelerinin Hesaplanması” ve “3.3.6. Alt Modül Anahtarlama Kayıplarının Hesaplanması” başlıkları altında bu veriler kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

3.4.2. Alt Modül Anahtarlama Sürelerinin Hesaplanması

MATLAB/Simulink ortamına aktarılan veriler daha kolay karşılaştırılması için kapı dirençlerinin 20Ω , 15Ω , 10Ω ve 5Ω olduğu çalışmalarda ölçümler üst üste çizilmiştir. Grafikler üst üste çizdirilirken V_{gs} gerilimlerin ilk artış noktaları üst üste gelecek şekilde hizalanmıştır. Şekil 3.4.12’de iletme giriş anı, Şekil 3.4.13’te ise iletimden çıkış anındaki I_d , V_{gs} , V_{ds} ve I_{diyot} değerleri (a), (b), (c) ve (d) grafiklerinde sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.4.12. Farklı kapı dirençleri için 800V/20A değerinde iletme giriş karşılaştırması. (a) I_D akımı. (b) V_{gs} gerilimi. (c) V_{ds} gerilimi. (d) I_{diyot} akımı.



Şekil 3.4.13. Farklı kapı dirençleri için 800V/20A değerinde iletimden çıkış karşılaştırması. (a) I_D akımı. (b) V_{gs} gerilimi. (c) V_{ds} gerilimi. (d) I_{diyot} akımı.

Şekil 3.4.12(b)'deki kapı gerilimlerinin 5V'a ulaşma süresi direnç değeri arttıkça artmaktadır. Şekil 3.4.12(a)'daki iletime giriş anındaki tepe akış akımı, direnç değerinin 20 Ω 'dan 5 Ω 'a düşerken sırasıyla 25.8A, 27.2A, 29.1A ve 32.2A değerine çıkmıştır. Aynı şeklin (d) grafiğindeki diyot akımının ulaştığı asgari değer direnç değeri azaldıkça -6.7A, -8.1A, -9.8A ve -12.9A değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde (c) grafiğinde verilen akış-kaynak geriliminin negatif tepe değerleri -8.0V, -16.0V, -88.0V ve -168.0V sırasıyla 20 Ω , 15 Ω , 10 Ω ve 5 Ω kapı direnci bağlıyken ölçülmüştür. Bu veriler doğrultusunda R_g direnci küçüldükçe V_{gs} ve I_{diyot} negatif tepe değerleri ile I_D pozitif tepe değerinin arttığı söylenebilmektedir. Ayrıca grafikteki veriler kullanılarak kapı direncinin 20 Ω olduğu koşulda I_D akım değişimi 679 A/ μ s ve V_{ds} gerilim değişimi 35 kV/ μ s; 5 Ω iken I_D akım değişimi 1330 A/ μ s ve V_{ds} gerilim değişimi 86 kV/ μ s olduğu hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değerler de kapı direnci küçüldükçe anahtarın iletime girme süresinin azaldığını ve daha yüksek gerilim/akım değişimleriyle sonuçlandığını göstermektedir.

Şekil 3.4.13'teki iletimden çıkış verileri incelendiğinde anahtara iletimden çıkma komutu gönderildikten sonra kapı direncinin artmasıyla (a) I_D akımı 0A'e ve (c) V_{ds} gerilimi 800V'a daha geç ulaşmaktadır. Bu durum da kapı direncinin artmasıyla iletimden çıkış süresinin arttığını göstermektedir. Fakat iletime girişte alınan ölçümlerin aksine iletimden çıkış anındaki akaç akımının negatif tepe değerleri birbirine çok yakındır. Akaç-kaynak geriliminin pozitif tepe değeri ise 20 Ω ve 15 Ω 'da 952V, 10 Ω 'da 968V, 5 Ω 'da 984V'a ulaşmıştır.

Şekil 3.4.12-13 grafikleri incelendikten sonra iletime giriş ve iletimden çıkış süreleri IEC 60747-8 standardına göre hesaplanmıştır [123, 143]. Standarda göre " $t_{d(on)}$ " süresi V_{gs} geriliminin %10'a çıktığı süre başlangıç olarak alınır ve V_{ds} geriliminin %90'a düştüğü süre bitiş olarak alınır. " t_r " süresi V_{ds} geriliminin %90 ile %10 arasındaki geçen süredir. Yine standarda göre " $t_{d(off)}$ " süresi V_{gs} geriliminin %90'a düştüğü süre başlangıç olarak alınır ve V_{ds} geriliminin %10'a çıktığı süre bitiş olarak alınır. " t_f " süresi V_{ds} geriliminin %10 ile %90 arasındaki geçen süredir.

Üretilen SiC MOSFET alt modül için 800V/20A değerinde standarda göre hesaplanan anahtarlama süreleri Çizelge 3.4.2'de verilmiştir. C3M0075120J SiC MOSFET veri sayfasında verilen anahtarlama süresine karşılık R_g grafiği kullanılarak 20 Ω , 15 Ω , 10 Ω ve 5 Ω direncine karşılık gelen anahtarlama süreleri Çizelge 3.4.3'te verilmiştir. Çizelge 3.4.2 ve Çizelge 3.4.3'teki veriler kullanılarak alt modül ölçüm sonuçları ile C3M0075120J SiC MOSFET anahtarın anahtarlama süreleri karşılaştırılmıştır. Aralarındaki yüzdellik fark (44) numaralı formül kullanılarak hesaplanıp Çizelge 3.4.4'te verilmiştir. Çizelge 3.4.2-4 tablolarında bulunan " t_r ", " $t_{d(on)}$ ", " t_f " ve " $t_{d(off)}$ " süreleri bir önceki paragrafta açıklanmıştır. Ek olarak " t_r " ve " $t_{d(on)}$ " sürelerinin toplanmasıyla toplam iletime giriş süresi (t_{on}); " t_f " ve " $t_{d(off)}$ " sürelerinin toplanmasıyla da toplam iletimden çıkış süresi (t_{off}) hesaplanmıştır.

Çizelge 3.4.2. Üretilen SiC MOSFET alt modül anahtarlama süreleri

800V, 20A, -5V/15V, 1.5mH koşulunda:						
R_g (Ω)	t_r (ns)	$t_{d(on)}$ (ns)	t_{on} (ns)	t_f (ns)	$t_{d(off)}$ (ns)	t_{off} (ns)
20	59	73	132	24	66	90
15	42	60	102	21	58	79
10	43	43	86	18	52	70
5	23	31	54	15	44	59

Çizelge 3.4.3. C3M0075120J SiC MOSFET anahtarlama süreleri [103]

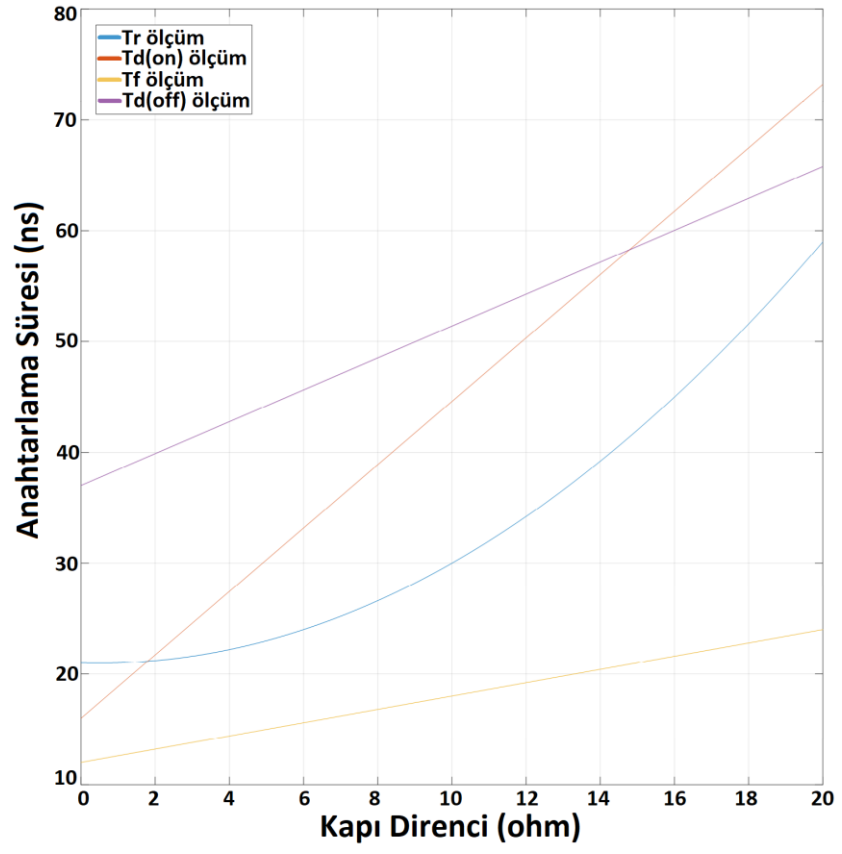
800V, 20A, -4V/15V, 156uH koşulunda:						
R_g (Ω)	t_r (ns)	t_{d(on)} (ns)	t_{on} (ns)	t_f (ns)	t_{d(off)} (ns)	t_{off} (ns)
20	22	42	64	16	58	74
15	19	34	53	15	49	64
10	16	25	41	12	41	53
5	15	16	31	10	33	43

Çizelge 3.4.4. Alt modül ve C3M0075120J anahtarlama sürelerinin karşılaştırması

R_g (Ω)	t_r	t_{d(on)}	t_{on}	t_f	t_{d(off)}	t_{off}
20	%168	%74	%106	%50	%14	%22
15	%121	%76	%92	%40	%18	%23
10	%169	%72	%110	%50	%27	%32
5	%53	%94	%74	%50	%33	%37

Çizelge 3.4.4'teki karşılaştırma tablosuna bakıldığında t_r değerlerindeki yüzdellik fark direnç azaldıkça azalmaktadır. Fakat 10 Ω değerindeki t_r değeri beklenenden yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, V_{ds} gerilimindeki yüksek frekanslı salınımdan dolayı standartta belirtilen %10 gerilime ulaştığı süresinin daha uzun olmasıdır ve bu değer dikkate alınmamıştır. t_{d(on)} değerleri incelendiğinde beklendiği gibi direnç azaldıkça açılma süresi azalmaktadır. Benzer şekilde t_f ve t_{d(off)} süreleri de referans anahtarda olduğu gibi dirençle birlikte azalmaktadır. Referans anahtar değerleri ile ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında toplam iletme giriş süresi (t_{on}) %100'e yakın fazla, toplam iletimden çıkış süresi (t_{off}) de %30'a yakın fazladır. Ölçülen sürelerin nanosaniye (ns) mertebelerinde olması, ölçüm aletlerinin örnekleme frekansı ve ölçüm aletlerinin de RC eşdeğer devresi olduğu için ölçüm anında kondansatörlerin şarj olması nedeniyle dinamik cevabı yavaşlaması, bahsedilen yüzdellik farkının oluşmasına neden olabilir.

Üretilen SiC MOSFET alt modülün Çizelge 3.4.2'deki veriler kullanılarak ikinci veya birinci dereceden fonksiyon oluşturulmuştur. Elde edilen bu fonksiyonlar kullanılarak 0 Ω ile 20 Ω aralığındaki anahtarlama süreleri hesaplanıp kapı direncine karşılık anahtarlama süresi grafiği Şekil 3.4.14'te verilmiştir.



Şekil 3.4.14. Üretilen SiC MOSFET alt modülün kapı direncine karşılık anahtarlama süresi grafiği

3.4.3. Alt Modül Anahtarlama Kayıplarının Hesaplanması

İdeal anahtarlarda ilettime giriş ve iletimden çıkış zamanları sıfır olduğu için herhangi bir kayıp oluşmamaktadır. Fakat anahtarlar ideal olmadığı için ilettime girişi veya iletimden çıkışında belirli bir süre geçmektedir. İlettime giriş veya çıkış anında da harcanan güç aşağıda verilen formüldeki gibi hesaplanabilmektedir.

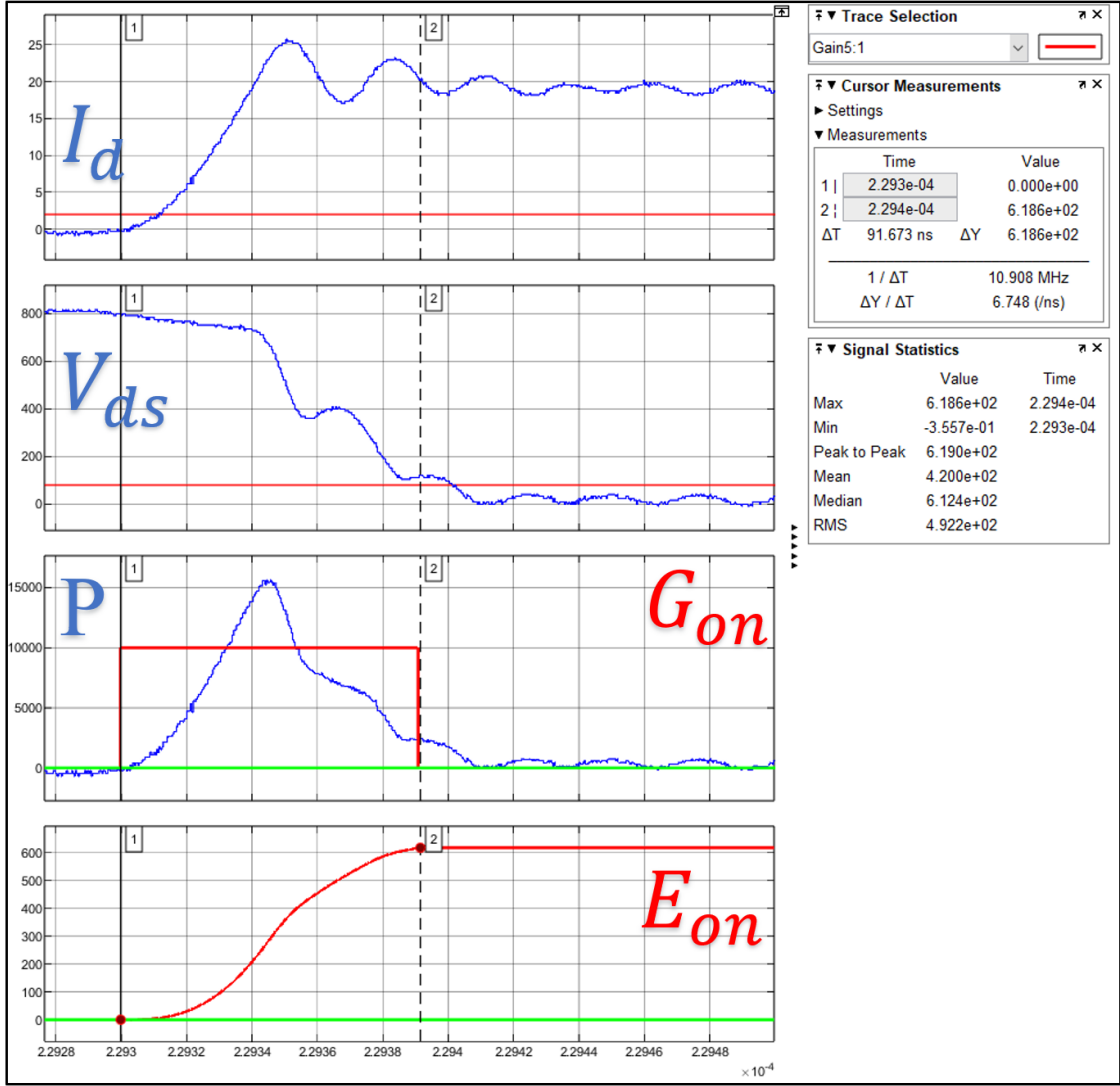
$$\bullet \quad P = V \times I \quad (48)$$

Bu kısımda IEC 60747-8 standardına göre ilettime giriş kaybı (E_{on}) ve iletimden çıkış kaybının (E_{off}) hesaplanmasından [123, 143] bahsedilecektir. E_{on} değeri anahtar akımının %10'una ulaştığı süre (t_0) ile anahtar geriliminin %10'a düştüğü süre (t_1) arasında hesaplanmaktadır. Bu değer aralığındaki anahtarın akım ve gerilim değeri çarpılır ve integrali alınır. Benzer şekilde E_{off} değeri hesaplanırken anahtar gerilim %10'una ulaştığı süre (t_2) başlangıç olarak alınır ve anahtar akımının %10'a düştüğü süre (t_3) bitiş olarak alınır. Bu süreler arasındaki anahtarın akım ve gerilim değeri çarpılır ve integrali alınır. İlettime giriş ve iletimden çıkış kayıplarının formülü aşağıda verilmiştir.

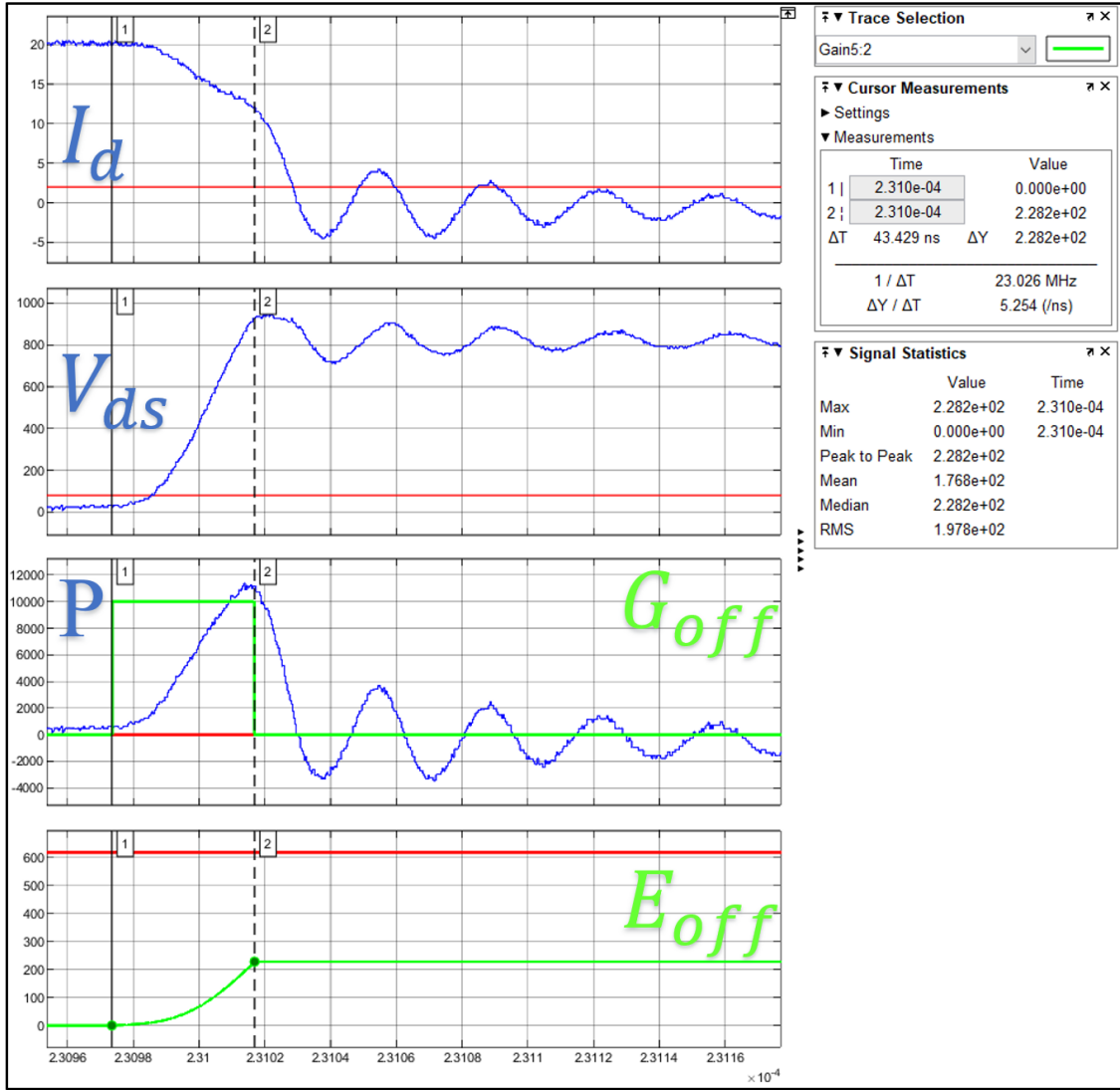
$$\bullet \quad E_{on} = \int_{t_0}^{t_1} V_{ds}(t) \times I_d(t) dt \quad (49)$$

$$\bullet \quad E_{off} = \int_{t_2}^{t_3} V_{ds}(t) \times I_d(t) dt \quad (50)$$

Alt modülden alınan veriler MATLAB/Simulink ortamında kullanılmıştır. Anahtarın akım ve gerilim değerleri çarpılmıştır. İlettime giriş süresi olan t_0 ile t_1 süresi belirlenip bu aralıkta 1, diğer aralıklarda ise 0 olacak şekilde G_{on} dalgası; iletimden çıkış süresi olan t_2 ile t_3 süresi belirlenip bu aralıkta 1, diğer aralıklarda ise 0 olacak şekilde G_{off} dalgası oluşturulmuştur. Ardında (49) ve (50) numaralı eşitliklerde gösterildiği gibi akım ve gerilim ile birlikte sırasıyla G_{on} ve G_{off} dalgalarıyla çarpılıp integrali alınmaktadır. İlettime giriş ve iletimden çıkış kayıplarının hesaplanmasında kullanıldığı örnek grafikler sırasıyla Şekil 3.4.15 ve Şekil 3.4.16'da verilmiştir.



Şekil 3.4.15. Örnek iletme giriş kaybının hesaplaması



Şekil 3.4.16. Örnek iletimden çıkış kaybının hesaplaması

C3M0075120J SiC MOSFET veri sayfasında [103] bulunan 23 (Fig23) ve 24 (Fig24) numaralı grafiklerde 600V ve 800V gerilim değerindeki akıma karşılık anahtarlama kayıpları; 25 numaralı (Fig25) grafikte ise 800V ve 20A değerinde alınan kapı direncine karşılık anahtarlama kayıpları verilmiştir. Bu veriler kullanılarak 600V ile 800V gerilimde 5A, 10A, 15A ve 20A'deki anahtarlama kayıpları 5 Ω , 10 Ω , 15 Ω ve 20 Ω kapı dirençleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Anahtarlama kayıplarının hesaplandığı formüller aşağıda verilmiştir.

- $E_{on_{600V_{20\Omega_{cal}}}} =$

$$E_{on_{600V_{0\Omega_{Fig23}}} \times \frac{E_{on_{600V_{0\Omega_{Fig23}}}}{E_{on_{800V_{0\Omega_{Fig24}}}} \times \frac{E_{on_{800V_{20\Omega_{Fig25}}}}{E_{on_{800V_{0\Omega_{Fig25}}}} \quad (51)$$

- $E_{off_{600V_{20\Omega_{cal}}} =$

$$Eoff_{600V_0\Omega_Fig23} \times \frac{Eoff_{600V_0\Omega_Fig23}}{Eoff_{800V_0\Omega_Fig24}} \times \frac{Eoff_{800V_20\Omega_Fig25}}{Eoff_{800V_0\Omega_Fig25}} \quad (52)$$

$$\bullet Eon_{800V_20\Omega_Cal} = Eon_{800V_0\Omega_Fig24} \times \frac{Eon_{800V_20\Omega_Fig25}}{Eon_{800V_0\Omega_Fig25}} \quad (53)$$

$$\bullet Eoff_{800V_20\Omega_Cal} = Eoff_{800V_0\Omega_Fig24} \times \frac{Eoff_{800V_20\Omega_Fig25}}{Eoff_{800V_0\Omega_Fig25}} \quad (54)$$

Üretilen alt modül ile referans anahtarın 600V gerilim altında 5Ω, 10Ω, 15Ω ve 20Ω kapı direncindeki E_{on} ve E_{off} değerleri Çizelge 3.4.5'te verilmiştir. 800V gerilim altındaki kayıp değerleri de Çizelge 3.4.6'da verilmiştir. Çizelge 3.4.5 ve Çizelge 3.4.6'da sarı ile gösterilen kayıp değerlerinde sapmalar olduğu için değerlendirmeye alınmamıştır. Çizelge 3.4.5 ve Çizelge 3.4.6'daki veriler kullanılarak üretilen alt modül ile referans anahtarın kayıp değerleri arasındaki fark (44) numaralı formül kullanılarak hesaplanıp Çizelge 3.4.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.4.5. 600V gerilim altında farklı kapı dirençleri için üretilen alt modül ile C3M0075120J anahtarların anahtarlama kayıpları

	Üretilen Alt Modül				C3M0075120J			
	600V 5.2A	600V 11.5A	600V 15A	600V 18.5A	600V 5.2A	600V 11.5A	600V 15A	600V 18.5A
Eon_20Ω (μJ)	120.0	184.6	292.3	287.0	48.0	80.9	110.6	147.4
Eon_15Ω (μJ)	103.0	131.8	230.3	198.6	44.7	75.3	103.0	137.3
Eon_10Ω (μJ)	74.6	106.3	142.6	163.3	38.1	64.1	87.7	116.9
Eon_5Ω (μJ)	50.5	81.5	101.5	114.0	28.7	48.3	66.1	88.1
Eoff_20Ω (μJ)	60.8	105.8	144.9	198.0	30.5	52.1	74.6	100.4
Eoff_15Ω (μJ)	59.0	98.0	131.2	179.9	26.9	45.9	65.7	88.4
Eoff_10Ω (μJ)	59.6	89.8	116.7	148.1	23.3	39.6	56.7	76.3
Eoff_5Ω (μJ)	57.9	82.0	96.5	128.2	19.2	32.6	46.7	62.9

Çizelge 3.4.6. 800V gerilim altında farklı kapı dirençleri için üretilen alt modül ile C3M0075120J anahtarların anahtarlama kayıpları

	Üretilen Alt Modül				C3M0075120J			
	800V 5.5A	800V 10.5A	800V 15.5A	800V 20.0A	800V 5.5A	800V 10.5A	800V 15.5A	800V 20.0A
Eon_20Ω (μJ)	201.8	322.4	380.8	636.3	138.2	203.8	292.4	401.0
Eon_15Ω (μJ)	169.3	263.9	316.7	475.6	128.6	190.0	272.2	373.3
Eon_10Ω (μJ)	142.3	208.8	205.5	349.2	109.5	161.6	231.9	318.0
Eon_5Ω (μJ)	94.8	129.3	151.7	197.8	82.6	121.8	174.7	239.6
Eoff_20Ω (μJ)	92.9	134.8	214.1	304.1	43.0	81.3	125.0	175.1
Eoff_15Ω (μJ)	90.9	126.6	189.9	275.3	37.8	71.6	110.0	154.1
Eoff_10Ω (μJ)	91.4	117.2	170.1	235	32.7	61.8	95.5	133.1
Eoff_5Ω (μJ)	96	114.1	156.3	190.8	26.9	51.0	78.3	109.8

Çizelge 3.4.7. 600V ve 800V gerilim altındaki anahtarlama kayıplarının karşılaştırması

	600V 5.2A	600V 11.5A	600V 15A	600V 18.5A	800V 5.5A	800V 10.5A	800V 15.5A	800V 20.0A
Eon_20Ω (μJ)	%150.0	%128.2	%164.3	%94.7	%46.0	%58.2	%30.2	%58.7
Eon_15Ω (μJ)	%130.4	%75.0	%123.6	%44.6	%31.6	%38.9	%16.3	%27.4
Eon_10Ω (μJ)	%95.8	%65.8	%62.6	%39.7	%30.0	%29.2	%-11.4	%9.8
Eon_5Ω (μJ)	%76.0	%68.7	%53.6	%29.4	%14.8	%6.2	%-13.2	%-17.4
Eoff_20Ω (μJ)	%99.3	%103.1	%94.2	%97.2	%116.0	%65.8	%71.3	%73.7
Eoff_15Ω (μJ)	%119.3	%113.5	%99.7	%103.5	%140.5	%76.8	%72.6	%78.7
Eoff_10Ω (μJ)	%155.8	%126.8	%105.8	%94.1	%179.5	%89.6	%78.1	%76.6
Eoff_5Ω (μJ)	%201.6	%151.5	%106.6	%103.8	%256.9	%123.7	%99.6	%73.8

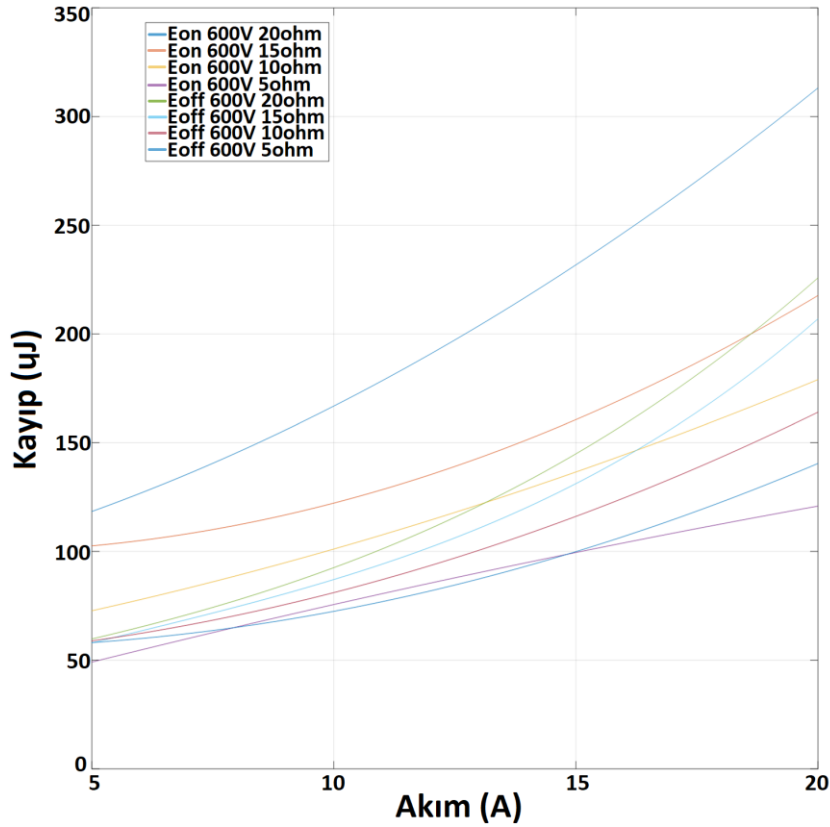
Üretilen alt modülün kayıpları C3M0075120J anahtara göre genellikle daha fazladır. Modül paketlemesinde kullanılan alt katman tasarımı, kullanılan 1 mil teller ve test devresinin parazitik endüktans değerlerinden dolayı anahtarlama anında daha fazla akım ve gerilim dalgalanmalarına neden olmaktadır. Gerilim ve akımın tepe noktası daha fazla olduğu için de anahtarlama kaybının daha fazla çıkmaktadır. Ayrıca alt modül anahtarlama testi sırasında kullanılan devrede yaylı pinler ile alt modüle bağlantılar sağlanmaktadır. Aradaki elektriksel bağlantının sağlanmasında kullanılan yaylı pinlerden dolayı parazitik endüktansın artmasına, bu nedenle de C3M0075120J anahtara göre daha fazla kayıp hesaplandığı düşünülmektedir.

Anahtarlama kaybının fazla çıkmasının ikinci nedeni ise ölçüm aletlerinin hassasiyetinden kaynaklanabilir. Örneğin gerilim ölçümünde kullanılan gerilim probun örnekleme hızı 200Mhz değerindedir. Bu değer 5ns mertebelerine karşılık gelmektedir. Özellikle kapı direnci 5 Ω değerindeyken iletme giriş ve iletimden çıkış süreleri 20-30ns seviyesindedir. Bu da ölçümlerde hata payını arttırabilmektedir. Ek olarak ölçüm aletlerinin de RC eşdeğer devresi bulunmaktadır ve ölçüm anında özellikle hızlı anahtarlamalarda dinamik cevabı daha yavaş olup ölçümlerde de salınımların oluşmasına neden olabilir. Ölçüm aletinden kaynaklı yanlış okuma durumu “3.3.4. Yüksek Gerilim Ölçüm Aletinin Etkisi” başlığı altında detaylı incelenmiştir.

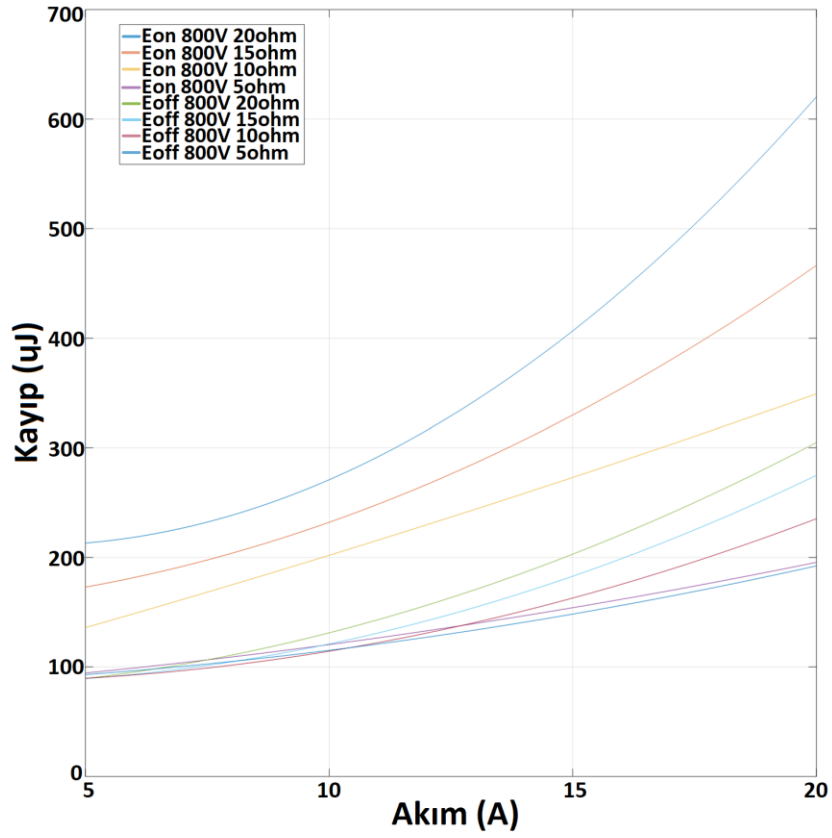
Çizelge 3.4.7’de gösterildiği gibi akım değeri arttıkça kayıplardaki hata oranı azalmaktadır. Bu da düşük akımlardaki ölçüm çözünürlüğünün daha küçük olmasından kaynaklanabilir. Örneğin $E_{on(800V)}$ 20 Ω kapı direncinde anahtar kayıpları 5 Ω’a göre daha fazladır, fakat C3M0075120J anahtar ile alt modül sonuçları arasındaki fark %50 bandındadır. Anahtar akımı arttıkça da yüzdedeki fark benzer kalmıştır. Fakat $E_{on(800V)}$ 5 Ω ölçümlerine baktığımızda anahtar kaybı 20 Ω’a göre daha az olduğu için akım arttıkça

ölçümler arasındaki fark azalmaktadır. Benzer durum $E_{off(800V)}$ değerleri için de geçerlidir. Ek olarak E_{off} kayıpları E_{on} kayıplarına göre çok daha az olduğu için ölçüm hatası çok daha fazla olmaktadır. 5 Ω 'daki $E_{off(800V)}$ kaybı, alt modül sonuçları ile C3M0075120J anahtar arasındaki farkın %257 olduğu görülmüştür. Bu da ölçümden kaynaklı aradaki farkın arttığı bilgisini doğrulamaktadır.

Üretilen SiC MOSFET alt modülün Çizelge 3.4.5 ve Çizelge 3.4.6'daki veriler kullanılarak ikinci veya üçüncü dereceden fonksiyon oluşturulmuştur. Elde edilen bu fonksiyonlar kullanılarak 0 Ω ile 20 Ω aralığındaki anahtarlama kayıpları hesaplanıp kapı direncine karşılık grafikler oluşturulmuştur. 600V gerilim değerindeki dirence karşılık anahtarlama kayıp grafiği Şekil 3.4.17'de, 800V gerilim altındaki grafik ise Şekil 3.4.18'de verilmiştir.



Şekil 3.4.17. Üretilen SiC MOSFET alt modülün 600V gerilim altında akıma karşılık anahtarlama kaybı grafiği



Şekil 3.4.18. Üretilen SiC MOSFET alt modülün 800V gerilim altında akıma karşılık anahtarlama kaybı grafiği

4. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

SiC tabanlı MOSFET anahtarların IGBT gibi Si tabanlı anahtarlara kıyasla üstün özellikleri olduğu için kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Geleneksel modül paketleme yöntemleri genellikle Si tabanlı anahtara uygun olarak geliştirilmiştir. SiC tabanlı anahtarlardan tam performans alınabilmesinde paketleme teknolojisinin önemi doğrultusunda bu tez çalışması yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında modül paket yapısına uygun alt modül üretimi gerçekleştirilmiştir. Paketleme sırasında çift tarafı bakır kaplı Al_2O_3 seramik alt katman lazer kesim cihazı ile işlenip hazır temin edilen SiC MOSFET ve diyot yongaların bağlanması gerçekleştirilmiştir. Kalın tel bağlama cihazı olmadığı için 1mil altın tel kullanılarak tel bağlama işlemi gerçekleştirilip izolasyon (kapsülleme) malzemesi ile alt modülün gerilim seviyesi yükseltilmiştir.

Hazır SiC MOSFET yonganın $R_{ds(on)}$ direnci " $V_{gs}=15V$ " değerinde veri sayfasında $75m\Omega$ olarak paylaşılmıştır. Alınan ölçümler sonucunda da alt modülün $R_{ds(on)}$ direnci değerinde $139.4m\Omega$ olarak ölçülmüştür. Bu da tel bağlama, alt modül devre tasarımı gibi alt modül parametreleri ile test devresinde kullanılan yaylı pinler, test devre kart tasarımı gibi çevresel etmenler ile birlikte toplam direnç değerinin $64.4m\Omega$ olduğu hesaplanmıştır. Gelecek çalışmalarda test devresinin etkisini devre dışı bırakmak için alt modül ölçümleri harici olarak gerçekleştirilebilir ve daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

Referans olarak alınan C3M0075120J numaralı ayırık anahtar ile karşılaştırmak için düşük gerilim altında kademeli olarak 10A değerine kadar akım uygulanıp farklı kapı gerilimlerinde ölçümler alınmıştır. Üretilen alt modül ile C3M0075120J numaralı ayırık anahtarın farklı kapı gerilimlerdeki I_D akımına karşılık gelen V_{ds} gerilimleri karşılaştırıldığında V_{ds} gerilimi " $V_{gs}=15V$ " altında %70-77 aralığında, " $V_{gs}=11V$ " altında %46-50 aralığında, " $V_{gs}=9V$ " altında %24-27 aralığında, " $V_{gs}=7V$ " %20 fazla çıkmıştır. Alt modülün paketten kaynaklı eş değer direnci, kapı gerilimi değişiminden etkilenmemektedir ve sabit bir değerdir. Fakat kapı gerilimine göre yonganın iletim direnci değişmektedir. Kapı gerilimi arttıkça yonganın üzerindeki gerilim azaldığı için ölçümlerdeki V_{ds} gerilimin yüzdelik farkı artmaktadır. Bu da SiC MOSFET yonganın $R_{ds(on)}$ direnci düştükçe de biraz önce bahsettiğimiz alt modülden kaynaklı direnç değeri daha baskın hale gelmektedir. Fakat 10A akım altında %77 gibi yüksek değerlerin çıkmasında test devresinden kaynaklanan direncin olması etkili olduğu ve alt modül ile

referans anahtarı arasındaki farkın %77'den daha küçük olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde ters paralel diyotun da karşılaştırması yapıldığında 10A akım altında %51 daha fazla gerilim ölçüldüğü gözlenmiştir. Yalnızca alt modül değerlendirmeye alındığında da %51'den küçük olması beklenmektedir. Gelecek çalışmalarda test devresinin ölçümlere etkisini minimize etmek için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Düşük gerilim testleri tamamlandıktan sonra gerilim seviyesi kademeli olarak artırılıp 800V altında ilk olarak düşük akım, daha sonra akım değeri kademeli olarak artırılıp 20A seviyelerinde ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak anahtarlama süresi ve anahtarlama kayıpları hesaplanıp detaylı şekilde paylaşılmıştır. Toplam iletme girme süresi 20Ω kapı direncinde referans anahtara göre %106, toplam kesime girme süresi de %22 daha fazla çıkmıştır. Kapı direnci 15Ω , 10Ω ve 5Ω iken de ölçümler alındığında toplam iletme girme ve kesime girme süresi, direnç değerinin düşmesiyle 15Ω 'da 102ns ve 79ns değerlerinden 5Ω 'da 54ns ve 59ns değerlerine düşmüştür. Referans anahtar değerleri ile ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında toplam iletme giriş süresi (t_{on}) %100'e yakın fazla, toplam iletimden çıkış süresi (t_{off}) de %30'a yakın fazladır. Bunun nedeni ölçülen sürelerin nanosaniye (ns) mertebelerinde olması ve ölçüm aletlerinin de RC eşdeğer devresi olduğu için yüksek farklar çıkmış olabilir. Farklı ölçüm aletleriyle alınan gerilim ölçümlerinde farklı sonuçlar elde edilmesi de ölçüm aletinden kaynaklanabileceğini göstermektedir. "3.3.4. Yüksek Gerilim Ölçüm Aletinin Etkisi" başlığında ölçüm aletinin etkisi ve iyileştirici önlemler detaylı belirtilmiştir. Belirtilen başlıkta da anlatıldığı gibi SiC MOSFET anahtarlar Si tabanlı anahtarlara göre daha düşük anahtarlama sürelerinde ve daha yüksek frekanslarda çalıştığı için daha yüksek dinamik cevabı olan ölçüm aletlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında kullanılan geleneksel yüksek gerilim diferansiyel ölçüm aletleri yerine fiber optikli ölçüm aletleri kullanılarak ortak mod zayıflama oranı yükseltilebilir ve daha yüksek bant genişliğine sahip ölçüm aletleri ile daha dinamik ölçümler hassas bir şekilde elde edilebilir. Ölçülen sinyallerdeki salınımlar veya zayıflamalar da en az düzeye indirilip ölçüm güvenilirliği artırılabilir. Gelecek çalışmalarda yüksek gerilim fiber optikli ölçüm aleti ile ölçümler gerçekleştirilip elde edilen test sonuçları incelenip geleneksel yüksek gerilim diferansiyel ölçüm aletleriyle karşılaştırılabilir. Ayrıca iletme girme süresindeki farkın giderilmesi için alt modüle uygun kapı sürücü kartı tasarımı da değerlendirilebilir. Kapı sürücü kartları genellikle kullanılan anahtara uygun şekilde optimize edilmektedir ve tez kapsamında kullanılan kapı sürücü kartı da

CAS300M17BM2 modülüne uygun tasarlanmıştır. Tez kapsamında üretilen alt modül ile CAS300M17BM2 modülü içindeki yongalar farklı elektriksel özelliklerde ve farklı anahtarlama sürelerine sahip olduğu için üretilen alt modüle göre kapı sürücü optimize edilebilir. Gelecek çalışmalarda kullanılan yongaya daha uygun ve daha dinamik cevap verebilen kapı sürücü kullanılarak alınan ölçümler incelenebilir. Anahtarlama kayıpları da “3.4.3. Alt Modül Anahtarlama Kayıplarının Hesaplanması” başlığında hesaplanıp üretilen alt modül için 600V ve 800V bara gerilimde kapı direncine karşılık anahtarlama kayıpları grafikleri oluşturulmuştur. C3M0075120J numaralı ayrık anahtarla karşılaştırıldığında ise kapı direnci 20Ω ve 800V gerilim altında E_{on} değeri %59, E_{off} değeri de %74 fazla çıkmıştır. Kapı direnci 5Ω iken E_{on} değeri %17 daha az, E_{off} değeri de %74 fazla çıkmıştır. Karşılaştırılan anahtarlardan biri modül paket yapısında, diğeri ise ayrık paket yapısında olduğu için anahtarlama kayıplarının farklı çıkması beklenen bir sonuçtur. Ayrıca nanosaniye mertebelerinde alınan ölçümler kullanıldığı için anahtarlama sürelerinin hesaplanmasında olduğu gibi anahtarlama kaybı hesabında da fiber optikli ve daha yüksek bant genişliği olan ölçüm aletleriyle değiştirilerek gelecek çalışmalarda incelenebilir.

Gelecek çalışmalarda ilk olarak kalın tel bağlama cihazı ile yeni bir alt modül üretimi gerçekleştirilebilir. Doğrulamalar tamamlandıktan sonra bir alt modül içerisinde birden fazla yonga paralel bağlanıp alt modülün akım taşıma kapasitesi arttırılabilir. Ardından birden fazla alt modülün paralel bağlandığı bir modül oluşturup prototip SiC MOSFET modül üretilmesi hedeflenmektedir. Yapılacak olan bu çalışmalar ile yerli SiC MOSFET modül üretimi için öncü çalışmalar olacağı düşünülmektedir. Ayrıca gelecek çalışmalarda AlN ve Al₂O₃ seramik DBC alt katman kullanımının uzun süreli anahtarlama testlerindeki termal performansına etkisi, yonga bağlama işleminde de gümüş sinterleme uygulaması ile hem elektriksel hem de termal açıdan sağlanan avantajlar incelenebilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] E. Erol, “Türkiye’de Elektrik Enerjisinin Tarihi Gelişimi: 1902–2000”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [2] H. Ritchie, P. Rosado, ve M. Roser, “Energy Production and Consumption - Our World in Data”, Our World In Data. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- [3] H. Lee, V. Smet, ve R. Tummala, “A Review of SiC Power Module Packaging Technologies: Challenges, Advances, and Emerging Issues”, *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, c. 8, sy 1, ss. 239-255, Mar. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2951801.
- [4] OnSemi, “TND6234/D - IGBT Technologies and Applications Overview: How and When to Use an IGBT”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/tnd6245-d.pdf>
- [5] Y. Wang, X. Dai, G. Liu, Y. Wu, D. Li, ve S. Jones, “Status and Trend of SiC Power Semiconductor Packaging”, *IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2015, doi: 10.1109/ICEPT.2015.7236613.
- [6] C. Buttay, H. Morel, M. Lazar, C. Raynaud, G. Civrac, ve D. Bergogne, “High-temperature behavior of SiC power diodes”, *IEEE Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011.
- [7] H. Jin, L. Qin, L. Zhang, X. Zeng, ve R. Yang, “Review of wide band-gap semiconductors technology”, *International Conference on Mechanical Engineering and Electrical Systems (ICMES)*, c. 40, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20164001006.
- [8] D. Kimoto, “Characterization and Modeling of SiC Integrated Circuits for Harsh Environment”, Student Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2017.
- [9] Rohm Semiconductor, “SiC Power Devices and Modules Application Note”, 2020. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/discrete/sic/common/sic_appli-e.pdf
- [10] K. Haotao, C. Guiqin, Z. Wei, L. Chengzhan, P. Yongdian, ve D. Xiaoping, “3.3kV/500A SiC Power Module for Railway Traction Application”, *PCIM Asia; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2018.
- [11] S. Seal ve H. A. Mantooth, “High performance silicon carbide power packaging - Past trends, present practices, and future directions”, *Energies (Basel)*, c. 10, sy 3, 2017, doi: 10.3390/en10030341.

- [12] X. Ding, M. Du, T. Zhou, H. Guo, C. Zhang, ve F. Chen, “Comprehensive comparison between SiC-MOSFETs and Si-IGBTs based electric vehicle traction systems under low speed and light load”, *Energy Procedia*, c. 88, ss. 991-997, Haz. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.124.
- [13] Y. Liu, S. Jiang, D. Jin, ve J. Peng, “Performance comparison of Si IGBT and SiC MOSFET power devices based LCL three-phase inverter with double closed-loop control”, *IET Power Electronics*, c. 12, sy 2, ss. 322-329, Şub. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.5702.
- [14] S. Ogata, D. Takayama, K. Asano, ve Y. Sugawara, “Thermal characteristics of 3kV, 600A 4H-SiC flat-package pn diodes”, *Electrical Engineering in Japan*, c. 171, sy 4, ss. 1-7, Haz. 2010, doi: 10.1002/ej.20978.
- [15] C. Dimarino, J. Li, ve R. Skuriat, “Packaging Technology for a Highly Integrated 10 kV SiC MOSFET Module”, *International Seminar on Power Semiconductors (ISPS)*, 2018.
- [16] C. D. Fuentes, M. Müller, S. Bernet, ve S. Kouro, “SiC-mosfet or Si-IGBT: Comparison of design and key characteristics of a 690 V grid-tied industrial two-level voltage source converter”, *Energies (Basel)*, c. 14, sy 11, Haz. 2021, doi: 10.3390/en14113054.
- [17] R. Leuzzi, V. G. Monopoli, F. Cupertino, ve P. Zanchetta, “Active Ageing Control of Winding Insulation in High Frequency Electric Drives”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, doi: 10.1109/ECCE.2018.8558257.
- [18] S. Jacques, “The Importance of Interconnection Technologies’ Reliability of Power Electronic Packages”, *INTECH/System Reliability*, 2017, doi: 10.5772/intechopen.69611.
- [19] B. Shi *vd.*, “A review of silicon carbide MOSFETs in electrified vehicles: Application, challenges, and future development”, *IET Power Electronics*, c. 16, sy 12, ss. 2103-2120, Eyl. 2023, doi: 10.1049/pel2.12524.
- [20] C. Chen, F. Luo, ve Y. Kang, “A Review of SiC Power Module Packaging: Layout, Material System and Integration”, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, c. 2, sy 3, ss. 170-186, Eyl. 2017, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2017.00017.
- [21] A. Marzoughi, A. Romero, R. Burgos, ve D. Boroyevich, “Comparing the State-of-the-Art SiC MOSFETs: Test results reveal characteristics of four major manufacturers? 900-V and 1.2-kV SiC devices”, *IEEE Power Electronics Magazine*, c. 4, sy 2, ss. 36-45, Haz. 2017, doi: 10.1109/MPEL.2017.2692309.
- [22] R. Ding, Z. Dou, Y. Qi, W. Mei, ve G. Liu, “Analysis on characteristic of 3.3-kV full SiC device and railway traction converter design”, *IET Power Electronics*, c. 15, sy 10, ss. 978-988, Ağu. 2022, doi: 10.1049/pel2.12280.
- [23] “Market focus: Power electronics”, *Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon*, c. 14, sy 10, ss. 70-73, 2021, Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [101](https://www.semiconductor-</p>
</div>
<div data-bbox=)

today.com/features/PDF/semiconductor-today-december-january-2021-Silicon-carbide.pdf

- [24] Yole Group, “Power SiC 2022 - Product Brochure”, 2022. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://medias.yolegroup.com/uploads/2022/03/Power-SiC-2022-Product_Brochure.pdf
- [25] F. Hou *vd.*, “Review of Packaging Schemes for Power Module”, *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, c. 8, sy 1, ss. 223-238, Mar. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2947645.
- [26] C. Buttay, “Packaging for Power Electronics”, Lyon, 2015. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://theses.hal.science/tel-01267363/file/presentation.pdf>
- [27] P.-E. Vidal, H. Medjahed, ve B. Nogarède, “Thermo-mechanical stress of bonded wires used in high power modules with alternating and direct current modes”, *Microelectronics Reliability*, c. 52, ss. 1099-1104, 2012, doi: 10.1016/j.microrel.2012.01.013.
- [28] S. La Mantia, L. Abbatelli, C. Brusca, M. Melito, ve M. Nania, “Design rules for paralleling of Silicon Carbide Power MOSFETs”, *PCIM Europe; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2017.
- [29] Z. Zheng, A. Lenze, D. Levett, K. Mainka, ve M. Zhang, “A practical example of hard paralleling SiC MOSFET modules”, *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia)*, 2019.
- [30] A. Fayyaz, B. Asllani, A. Castellazzi, M. Riccio, ve A. Irace, “Avalanche ruggedness of parallel SiC Power MOSFETs”, *Microelectronics Reliability*, c. 88-90, 2018, ss. 666-670.
- [31] A. E. Risseh, H.-P. Nee, ve K. Kostov, “Electrical Performance of Directly Attached SiC Power MOSFET Bare Dies in a Half-Bridge Configuration”, *IEEE International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC - ECCE Asia)*, 2017, doi: 10.1109/IFEEEC.2017.7992074.
- [32] Z. Huang, C. Chen, Y. Xie, Y. Yan, Y. Kang, ve F. Luo, “A High-Performance Embedded SiC Power Module Based on a DBC-Stacked Hybrid Packaging Structure”, *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, c. 8, sy 1, ss. 351-366, Mar. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2943635.
- [33] Y. Sun *vd.*, “Review of the recent progress on GaN-based vertical power Schottky barrier diodes (SBDs)”, *Electronics (Switzerland)*, c. 8, sy 5, May. 2019, doi: 10.3390/electronics8050575.
- [34] C. M. Dimarino, B. Mouawad, C. M. Johnson, D. Boroyevich, ve R. Burgos, “10-kV SiC MOSFET Power Module with Reduced Common-Mode Noise and Electric Field”, *IEEE Trans Power Electron*, c. 35, sy 6, ss. 6050-6060, Haz. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2952633.
- [35] M. Liu, A. Coppola, M. Alvi, ve M. Anwar, “Comprehensive Review and State of Development of Double-Sided Cooled Package Technology for

- Automotive Power Modules”, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, c. 3, ss. 271-289, 2022, doi: 10.1109/OJPEL.2022.3166684.
- [36] Infineon, “Wide Bandgap Semiconductors (SiC/GaN)”, Infineon Technologies. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-bandgap-semiconductors-sic-gan/>
- [37] R. Singh ve GeneSiC Semiconductor Inc., “Silicon Carbide Switches in Emerging Applications”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.pdma.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-semiconductor/presentations/16-silicon-carbide-switches-emerging-applications.pdf>
- [38] G. Vacca ve SemiconductorTODAY, “Benefits and advantages of silicon carbide power devices over their silicon counterparts”, *Compounds & Advanced Silicon*, c. 12, sy 3, 2017, Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.semiconductor-today.com/features/PDF/semiconductor-today-apr-may-2017-Benefits-and-advantages.pdf>
- [39] B. Zhang ve S. Wang, “A Survey of EMI Research in Power Electronics Systems with Wide-Bandgap Semiconductor Devices”, *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, c. 8, sy 1, ss. 626-643, Mar. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2953730.
- [40] Mitsubishi Electric, “FMF400BX-24B Full SiC Power Modules”, 2022. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/datasheets/sic/fmf400bx-24b_e.pdf
- [41] Cree / Wolfspeed, “CAB450M12XM3 SiC Power Module”, 2019. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/CAB450M12XM3.pdf>
- [42] Cree / Wolfspeed, “CAS300M12BM2 SiC Half-Bridge Module”, 2021. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/cas300m12bm2.pdf>
- [43] Rohm Semiconductor, “BSM300D12P2E001 SiC Power Module”, 2018. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/power_module/bsm300d12p2e001-e.pdf
- [44] Infineon, “FF08MR12W1MA1_B11A SiC Power Module”, 2020. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/modules/ff08mr12w1ma1_b11a/
- [45] Yole Group, “Power SiC 2017: Materials, Devices, Modules, and Applications”, 2017.
- [46] S. Li, “Packaging Design of IGBT Power Module Using Novel Switching Cells”, Doctoral Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, 2011.

- [47] L. Y. Chen *vd.*, “Packaging technologies for 500°C SiC electronics and sensors”, *Materials Science Forum*, c. 717-720, ss. 1033-1036, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.717-720.1033.
- [48] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, ve P. Tavner, “Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review”, *IEEE Trans Power Electron*, c. 25, sy 11, ss. 2734-2752, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2049377.
- [49] Mitsubishi Materials, “DBA (Direct Bonded Aluminum) substrate”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mmc.co.jp/adv/ele/en/products/dba/index.html>
- [50] QY Reserach, “Global Ceramic Substrate Market Research Report 2023”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.qyresearch.com/reports/908985/ceramic-substrate>
- [51] A. Miric, M. Sc, ve P. Dietrich, “Inorganic Substrates for Power Electronics Applications”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/metal_ceramic_substrates_documents/Inorganic_Substrates_for_Power_Electronics_2015-3_AMiric-PDietrich_V8.pdf
- [52] U. Geissler, S. Thomas, J. Goehre, ve M. Schneider, “A new Aluminium Alloy for Heavy Wire Bonding in Power Electronics - First Tests of Bonding Behaviour and Reliability”, *PCIM Europe*, 2013.
- [53] Heraeus, “Bonding Wires for Semiconductor Technology”, 2017. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/bonding_wires_documents/Brochure_Bonding_Wire.pdf
- [54] K. Liu, J. Yang, J. Luo, L. Wang, Q. Huang, ve F. Chen, “The characterization and application of chip topside bonding materials for power modules packaging: A review”, *J Phys Conf Ser*, c. 1605, sy 1, Ağu. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1605/1/012168.
- [55] SanRex, “FCA150AC120 SiC Power Module”, 2019. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.sanrex.com/wp-content/uploads/2021/06/FCA150AC120_e.pdf
- [56] C. Féry ve A. Hinrich, “Die Top System A Competitive Extension of Magic Sintering”, *PCIM Europe Digital Days*, 2021.
- [57] RF Cafe, “Gold Aluminum Bond Wire Properties”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.rfcafe.com/references/electrical/bond-wire-specs.htm#gold-aluminum-bond-wire>
- [58] S. Chowdhury, E. Gurpinar, ve B. Ozpineci, “Capacitor Technologies: Characterization, Selection, and Packaging for Next-Generation Power Electronics Applications”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, c. 8, sy 2, ss. 2710-2720, Haz. 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3139806.

- [59] onsemi, “NTC160N120SC1 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.onsemi.jp/download/data-sheet/pdf/ntc160n120sc1-d.pdf>
- [60] onsemi, “NTC080N120SC1 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.onsemi.cn/download/data-sheet/pdf/ntc080n120sc1-d.pdf>
- [61] Yes Power Technix, “PM130N120LB - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.everythingpe.com/products/mosfets/yes-power-technix/17-374-pm130n120lb>
- [62] Cree / Wolfspeed, “CPMF-1200-S160B - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.wolfspeed.com/cpmf-1200-s160b/>
- [63] onsemi, “NTC040N120SC1 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.onsemi.cn/download/data-sheet/pdf/ntc040n120sc1-d.pdf>
- [64] Rohm Semiconductor, “S2301- Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2016. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/mosfet/s2301-e.pdf>
- [65] Basic Semiconductor, “BC1M080120 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.basicsemi.com/en/h-pd-4.html>
- [66] Cree / Wolfspeed, “CPMF-1200-S080B - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/CPMF-1200-S080B.pdf>
- [67] onsemi, “NTC020N120SC1 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ntc020n120sc1-d.pdf>
- [68] Rohm Semiconductor, “S4102 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2018. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/mosfet/s4102-e.pdf>
- [69] Rohm Semiconductor, “S4103 - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2018. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/mosfet/s4103-e.pdf>
- [70] Wolfspeed, “CPM3-1200-0021A - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/08/Wolfspeed_CPM3-1200-0021A_data_sheet_external.pdf
- [71] Wolfspeed, “CPM3-1200-0016A - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/08/Wolfspeed_CPM3-1200-0016A_data_sheet_external.pdf

- [72] Wolfspeed, “CPM3-1200-0013A - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/08/Wolfspeed_CPM3-1200-0013A_data_sheet_external.pdf
- [73] Basic Semiconductor, “BC1D20120 - Silicon Carbide (SiC) Schottky Diode, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.basicsemi.com/en/h-pd-4.html>
- [74] Basic Semiconductor, “BC1D50120 - Silicon Carbide (SiC) Schottky Diode, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.basicsemi.com/en/h-pd-4.html>
- [75] Wolfspeed, “CPM3-1200-0075A - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/08/Wolfspeed_CPM3-1200-0075A_data_sheet_external.pdf
- [76] Wolfspeed, “CPM3-1200-0032A - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/08/Wolfspeed_CPM3-1200-0032A_data_sheet_external.pdf
- [77] Cree / Wolfspeed, “EPW4-1200-S020A - Silicon Carbide (SiC) Schottky Diode, Bare Die”, 2018. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/EPW4-1200-S020A.pdf>
- [78] Toshiba, “Power MOSFET Electrical Characteristics”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://toshiba.semicon-storage.com/info/application_note_en_20230209_AKX00063.pdf?did=13415
- [79] Wolfspeed, “CPW4-1200-S020B - Silicon Carbide (SiC) Schottky Diode, Bare Die”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/10/Wolfspeed_CPW4-1200-S020B_data_sheet.pdf
- [80] Cree / Wolfspeed, “CPM2-1200-0080A - Silicon Carbide (SiC) MOSFET, Bare Die”, 2020. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2021/05/CPM2-1200-0080A.pdf>
- [81] Cree / Wolfspeed, “CPW5-1200-Z050B - Silicon Carbide (SiC) Schottky Diode, Bare Die”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://datasheetspdf.com/mobile/785822/Cree/CPW5-1200-Z050B/1>
- [82] Ahmed M. R., Todd R., ve Forsyth A. J., “Switching Performance of a SiC MOSFET Body Diode and SiC Schottky Diodes at Different Temperatures”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, doi: 10.1109/APEC43580.2023.10131399.
- [83] Y. K. Song ve V. Bukva, “Challenges on ENEPIG Finished PCBs: Gold Ball Bonding and Pad Metal Lift”, *IPC APEX EXPO*, 2016.
- [84] Y. Qin *vd.*, “Thermal management and packaging of wide and ultra-wide bandgap power devices: a review and perspective”, *J Phys D Appl Phys*, c. 2023, sy 9, 2023, doi: 10.1088/1361-6463/acb4ffi.

- [85] Z. Chen *vd.*, “Development of an SiC multichip phase-leg module for high-temperature and high-frequency applications”, *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, c. 13, sy 2, ss. 39-50, Nis. 2016, doi: 10.4071/imaps.503.
- [86] Indium Corporation, “Application Note - Soft Solder Die Attach”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.indium.com/technical-documents/application-notes/>
- [87] H. S. Chin, K. Y. Cheong, ve A. B. Ismail, “A Review on Die Attach Materials for SiC-Based High-Temperature Power Devices”, *Metallurgical and Materials Transactions B: The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, c. 41, sy 4, ss. 824-832, Ağu. 2010, doi: 10.1007/s11663-010-9365-5.
- [88] C. Buttay, B. Allard, ve R. Riva, “Silver sintering for power electronics integration”, *International Conference on Electronic Packaging, IMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)*, ss. 554-558, May. 2015, doi: 10.1109/ICEP-IAAC.2015.7111076.
- [89] TPT Wire Bonder GmbH, “Overview - Bonding Machines”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tpt-wirebonder.com/overview/>
- [90] Inseto, “Die Bonder Equipment | Manual and Semiautomatic Die Bond Machines”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.inseto.co.uk/equipment/manual-die-bonders-by-tresky-ag/>
- [91] Inseto, “Die Bonding Equipment | Automatic Die Bond | Advanced Packaging”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.inseto.co.uk/equipment/automatic-die-bonders-by-amadyne/>
- [92] TPT Wire Bonder GmbH, “TPT Application Note - Ribbon Bonding”, 2010. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tpt-wirebonder.com/applications/>
- [93] TPT Wire Bonder GmbH, “HB16 - Semi Automatic Wire Bonder”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tpt-wirebonder.com/hb16/>
- [94] TPT Wire Bonder GmbH, “TPT Application Note - Standard 25 μ gold ball-wedge bonding”, 2012. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tpt-wirebonder.com/applications/>
- [95] J. H. Lienhard, *A Heat Transfer Textbook, Third Edition*. Phlogiston Press, 2001.
- [96] RayTech, “Magic Power Gel”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.raytech.it/en/product/low-voltage/fillers/gel/magic-power-gel>
- [97] CHT Germany GmgH, “EGel3000 Silicone Encapsulants”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cht-silicones.com/products/encapsulants/EGel3000>
- [98] Dow, “Sylgar 527 A&B Silicone Dielectric Gel”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.dow.com/en-us/pdp.sylgard-527-ab-silicone-dielectric-gel.01512269z.html#overview>

- [99] Hellermann Tyton, “Relicon, Religel Plus Religel Plus 500 (435-00756)”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.hellermanntyton.com/products/gel-technology/religel-plus-500/435-00756>
- [100] Z. Wang, M. Chinthavali, S. L. Campbell, T. Wu, ve B. Ozpineci, “A 50-kW Air-Cooled SiC Inverter with 3-D Printing Enabled Power Module Packaging Structure and Genetic Algorithm Optimized Heatsinks”, *IEEE Trans Ind Appl*, c. 55, sy 6, ss. 6256-6265, Kas. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2938471.
- [101] E. Gurpinar ve B. Ozpineci, “Loss Analysis and Mapping of a SiC MOSFET Based Segmented Two-Level Three-Phase Inverter for EV Traction Systems”, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2018, doi: 10.1109/ITEC.2018.8450188.
- [102] M. Saladi ve M. Bashir, “Loss Determination in IGBT/SiC Converters Using a Non-linear Permanent Magnet Synchronous Machine Model”, Master Thesis, Chalmers University Electrical Engineering, Gothenburg, 2019.
- [103] Cree / Wolfspeed, “C3M0075120J SiC Power MOSFET”, 2019. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/C3M0075120J.pdf>
- [104] Harimatec Inc., “Silver paste with high thermal conductivity, NH Series, NPS-HB”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://harimatec.com/wp/pdf/TC_silver_paste.pdf
- [105] Shenzhen Jufeng Solder Co. Ltd., “Pressureless Silver Sintering Paste | Silver Sintering”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://jfsolder.com/12-pressureless-silver-sintering-paste.html>
- [106] Shenzhen Jufeng Solder Co. Ltd., “Pressure Silver Sintering Paste | Silver Sintering”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://jfsolder.com/12-pressure-silver-sintering-paste.html>
- [107] T. Zhou, T. Bobal, M. Oud, J. Songliang, ve Coining Inc., “Au/Sn Solder Alloy and Its Applications in Electronics Packaging”, 2010. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.inseto.co.uk/wp-content/uploads/2020/05/Gold-Tin-Soldering-in-Electronic-Packaging.pdf>
- [108] S. Race, A. Philipp, M. Nagel, T. Ziemann, I. Kovacevic-Badstuebner, ve U. Grossner, “Circuit-Based Electrothermal Modeling of SiC Power Modules With Nonlinear Thermal Models”, *IEEE Trans Power Electron*, c. 37, sy 7, ss. 7965-7976, Tem. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3147688.
- [109] Y. Yang vd., “Design and development of power module co-packaged with SiC GTO and SiC PiN”, *IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2018, doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480708.
- [110] Ametek / Coining, “Tin63 - Lead37 (Sn63Pb37) Solder Paste Datasheet”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.ametekinterconnect.com/-/media/ametek-ecp/v2/files/cw_datasheets_sds_cfsi/datasheets/sn63pb37%20data%20sheet.pdf?la=en

- [111] Rohm Semiconductor, “Thermal Design Application Note - Basics of Thermal Resistance and Heat Dissipation”, 2021. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/common/basics_of_thermal_resistance_and_heat_dissipation_an-e.pdf
- [112] Coil Technology Corporation, “What is clearance and creepage distance of insulation?” Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.powerctc.com/en/node/4757>
- [113] C. Buttay *vd.*, “Application of the PCB-Embedding Technology in Power Electronics-State of the Art and Proposed Development”, *3D-PEIM 2018 - 2nd International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing*, Kas. 2018, doi: 10.1109/3DPEIM.2018.8525236.
- [114] Wolfspeed, “LTspice & PLECS models”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.wolfspeed.com/tools-and-support/power/ltspace-and-plecs-models/>
- [115] Mitsubishi Electric, “FMF600DXE-24BN Full SiC Power Module”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/datasheets/sic/fmf600dxe-24bn_e.pdf
- [116] Mitsubishi Electric, “FMF400DY-24B Full SiC Power Module”, 2022. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/datasheets/sic/fmf400dy-24b_e.pdf
- [117] Wolfspeed, “CAS380M17HM3 SiC Half-Bridge Module”, 2022. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/dlm_uploads/2022/02/CAS380M17HM3.pdf
- [118] Wolfspeed, “CAB008M12GM3 & CAB008M12GM3T SiC Half-Bridge Module”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/05/Wolfspeed_CAB008M12GM3_data_sheet.pdf
- [119] Wolfspeed, “CAB425M12XM3 SiC Half-Bridge Module”, 2020. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/cab425m12xm3.pdf>
- [120] Wolfspeed, “CAS300M17BM2 SiC Half-Bridge Module”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/cas300m17bm2.pdf>
- [121] Infineon, “FF55MR12W1M1H_B11 EasyDUAL Module”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/modules/ff55mr12w1m1h_b11/
- [122] Infineon, “FF2MR12KM1HP 62mm C-Series Module”, 2023. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/modules/ff2mr12km1hp/>

- [123] J. Schweickhardt ve K. Hermanns, “Application Note - Tips & Tricks on Double Pulse Testing”, 2021. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/gfm347/GFM347_1e_Double_Pulse_Testing.pdf
- [124] V. Barkhordarian ve E. Segundo, “Power MOSFET Basics”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.infineon.com/dgdl/mosfet.pdf?fileId=5546d462533600a4015357444e913f4f>
- [125] HumiSeal, “Acrylics Conformal Coatings 1B31”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://chasecorp.com/HumiSeal/products/acrylics/1b31/>
- [126] J. Janesch ve Keithley Instruments Inc., “Two-Wire vs. Four-Wire Resistance Measurements: Which Configuration Makes Sense for Your Application?”, 2013. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://download.tek.com/document/2Wire_4Wire%20Resistance%20Article.pdf
- [127] X. Fang, “Characterization and Modeling of SiC Power MOSFETs”, Master Thesis, The Ohio State University Electrical and Computer Science, Columbus, 2012.
- [128] Vishay Siliconix, “AN-957 Application Note - Measuring Power MOSFET Characteristics”, 2010. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.vishay.com/docs/90715/an957.pdf>
- [129] B. J. Nel ve S. Perinpanayagam, “A Brief Overview of SiC MOSFET Failure Modes and Design Reliability”, *Procedia CIRP*, c. 59, ss. 280-285, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.09.025.
- [130] O. G. Düşmezer, “Silisyum Karbür MOSFET’ler için Kontrollü Aktif Kapı Sürücü Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2022.
- [131] Tektronix, “Application Note - Probing Techniques for Accurate Voltage Measurements on Power Supplies with Oscilloscopes”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://download.tek.com/document/Voltage%20on%20Power%20Supplies_App-Note_51W-60161-3.pdf
- [132] B. Mak ve Texas Instruments, “SLVA652A Application Report - Basics of Load Switches”, 2014. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.ti.com/lit/an/slva652a/slva652a.pdf>
- [133] Teledyne LeCroy, “HVFO108 High Voltage Fiber Optically-isolated Probe Datasheet”, 2020. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cdn.teledynelecroy.com/files/pdf/hvfo-probes-datasheet.pdf>
- [134] W. Kaunds ve Teledyne LeCroy, “Application Note - How to Choose the Best High Voltage Oscilloscope Probe in 5 Minutes”, 2022. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cdn.teledynelecroy.com/files/appnotes/best-hv-probe-in-5-min.pdf>

- [135] Tektronix, “IsoVu Isolated Probes”. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/oscilloscope-probes/isovu-isolated-probes>
- [136] H. Geramirad, F. Morel, B. Lefebvre, C. Vollaie, ve A. Breard, “Measuring small differential-mode voltages with high common-mode voltages and fast transients – Application to gate drivers for wide band-gap switches”, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, 2020, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245720.
- [137] S. Yin, K. J. Tseng, R. Simanjorang, ve P. Tu, “Experimental Comparison of High-Speed Gate Driver Design for 1.2-kV/120-A Si IGBT and SiC MOSFET Modules”, *IET Power Electronics*, c. 10, sy 9, ss. 979-986, Tem. 2017, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0668.
- [138] Infineon, “AN2017-46 - CoolSiC 1200 V SiC MOSFET Application Note”, 2018. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CoolSiC_MOSFET_1200V-SiC_trench_power_device-ApplicationNotes-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462617643590161c27fbcd0aae
- [139] T. Wu, J. Chen, S. Mao, ve M. J. Schutten, “1200V SiC MOSFETS for high voltage power conversion”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342523.
- [140] OnSemi, “AND90103/D Application Note - onsemi M 1 1200 V SiC MOSFETs & Modules: Characteristics and Driving Recommendations”, 2022. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and90103-d.pdf>
- [141] K. C. Tee, “Driving and Protecting SiC MOSFETs: Specs and Standards - Technical Articles”, Bodo’s Power Systems. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://eepower.com/technical-articles/it-is-easy-to-drive-protect-sic-mosfet/#>
- [142] S. Hauser ve Semikron Danfoss, “Full SiC Performance in Power Modules”, *Bodo’s Power Systems*, 2018. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.semikron-danfoss.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-article-full-sic-perfomance-bodos-power-systems-en-2018-03-01.pdf>
- [143] *IEC 60747-8, Semiconductor devices - Discrete devices - Part 8: Field-effect transistors*. 2010.

EKLER

EK 1 - Türkçe/İngilizce Sözlük

Akrilik Konformal Kaplama	Acrylic Conformal Coating
Alt Katman	Substrate
Anahtarlama	Switching
Anahtarlama Kaybı	Switching Loss
Anahtarlama Süresi	Switching Time
Aşındırma	Etching
Ayrık Paket	Discrete Package
Azınlık Taşıyıcı Aygıt	Minority Carrier Device
Bağlamasız Paketleme	Bondless Packaging
Bağlantı Güvenilirliği	Joint Reliability
Bant Genişliği	Bandwidth
Bozulma gerilimi	Breakdown Voltage
Çıkış	Output
Çınlama	Ringing
Çift Darbe Testi	Double Pulse Test
Çoğunluk Taşıyıcı Aygıt	Majority Carrier Device
Çok Katmanlı Seramik Kondansatör	Multilayer Ceramic Capacitor
Darbeli Akaç Akımı	Pulsed Drain Current
Dekuplaj Kondansatör	Decoupling Capacitor
Denetleyici Alan Ağı	Controller Area Network
Deşarj	Discharge
Dielektrik Dayanım	Dielectric Strength
Doğrudan Bağlamalı Alüminyum	Direct Bonding Aluminum
Doğrudan Bağlamalı Bakır	Direct Bonding Copper
Elektrikli araç	Electric Vehicle
Elektromanyetik Girişim	Electromagnetic Interference
Elektromanyetik Uyumluluk	Electromagnetic Compatibility
Fiber Optikli İzole Ölçüm Aleti	HV Fiber-Optically Isolated Probe
Fotovoltaik Dönüştürücü	Photovoltaic Converter
Geleneksel Yüksek Gerilim Diferansiyel Ölçüm Aleti	Conventional HV Differential Probe
Geniş Bant Aralığı	Wide Band Gap
Gerilim aşımı	Voltage Overshoot
Giriş	Input
Görünür Işık	Visible Light
Gövde Diyotu	Body Diode
Güç Döngü Kapasitesi	Power Cycling Capacity
Güç Kaybı	Power Loss
Güç Kaynağı	Power Supply
Gümüş Sinterleme	Silver Sintering
Isıl Direnç	Thermal Resistance

İletim	Conduction
İletimden Çıkış/Kapatmak	Turn Off
İletime Girişi/Açmak	Turn On
İnce Tel	Fine Wire
İzolasyon Boşluğu	Clearance
Jonksiyon	Junction
Kaçak akım	Leakage Current
Kaçak Yolu	Creepage
Kalın Tel	Heavy Wire
Kalın Tel Bağlama Cihazı	Heavy Wire Bonder
Kalıp Bağlama	Clip Bonding
Kapsülleme	Encapsulation
Lehim Alaşım	Solder Alloy
Modül Paket	Module Package
Negatif Sıcaklık Katsayısı	Negative Temperature Coefficient
Ortak Mod Gürültüsü	Common Mode Noise
Ortak Mod Zayıflatma Oranı	Common Mode Rejection Ratio
Parazitik Endüktans	Parasitic Inductance
Pozitif Sıcaklık Katsayısı	Positive Temperature Coefficient
Raylı Sektörü	Railway Industry
Salınım	Oscillation
Serbest Tekerlek Diyotu	Freewheel Diode
Soğutucu Plaka	Heat Sink
Sürekli Akaç Akımı	Continuous Drain Current
Şarj İstasyonu	Charger Station
Şarj İstasyonu	Charger Station
Şerit Bağlama	Ribbon Bonding
Tel Bağlama	Wire Bonding
Termal Döngü	Thermal Cycling
Termal Genleşme Katsayısı	Coefficient of Thermal Expansion
Termal İletkenlik	Thermal Conductivity
Ters Transfer	Reverse Transfer
Ters-Paralel Diyot	Anti-Parallel Diode
Test Yapılan Cihaz	Device Under Test
Veri Sayfası	Datasheet
Yarı-iletkenler	Semiconductor
Yarım Köprü	Half Bridge
Yaşlanma	Ageing
Yonga	Die
Yonga Bağlama	Die Bonding
Yüksek Gerilim	High Voltage
Zayıflama	Attenuation

